

文章编号:1001-9014(2006)04-0246-05

## 具有低噪读出特性的 VO<sub>2</sub> 非致冷焦平面读出电路

陈西曲<sup>1,2</sup>, 易新建<sup>1,3</sup>, 王强<sup>1</sup>

- (1. 华中科技大学 光电系, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074;  
3. 华中科技大学 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**介绍了一种针对二氧化钒敏感材料的 CMOS 读出电路 (ROIC)。该电路结构简单, 适合大规模焦平面阵列, 并具有良好的低噪特性, 可以有效地降低焦平面衬底温度波动影响和抑制一些低频噪声。该读出电路已成功地应用于 32 × 32 元微测辐射热计焦平面阵列原型。

**关键词:**非致冷红外焦平面; 二氧化钒; 读出电路

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A

## LOW-NOISE READOUT CIRCUIT OF VO<sub>2</sub>-BASED UNCOOLED FOCAL PLANE ARRAY

CHEN Xi-Qu<sup>1,2</sup>, YI Xin-Jian<sup>1,3</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>

- (1. Department of Optoelectronics Engineering, HUST, Wuhan 430074, China;  
2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China;  
3. State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A complementary metal oxide semiconductor (CMOS) readout integrated circuit (ROIC) for the sensitive material of vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) was introduced. The ROIC is simply configurable which is adaptable to large-scale focal plane arrays, and has excellent low-noise performance, which can effectively reduce the influence of changes in the substrate temperature and depress some low-frequency noise. The readout circuit has successfully been applied for prototypes of 32 × 32 element microbolometric focal plane arrays (FPAs).

**Key words:** UIRFPA; VO<sub>2</sub>; ROIC

### 引言

相对于致冷型红外焦平面来说, 非致冷型红外焦平面具有优越的性价比优势<sup>[1]</sup>。非致冷型红外焦平面的成本仅为致冷型 (HgCdTe、InSb) 的 1/3 到 1/5, 以后将降到 1/10 到 1/100 左右。而且随着非致冷红外焦平面工艺水平的提高, 其性能逐渐逼近致冷型红外焦平面: 一般高端致冷型红外焦平面的噪声等效温度 (NETD/K) 大约为 0.01K (f/1#) 左右, Raytheon 公司已经生产出了成熟的 320 × 240 非致冷型红外焦平面, 其 NETD/K 仅为 0.03K (f/1#), 该公司已经着手进行 NETD/K 达 0.01K (f/1#) 320 × 240 非致冷型红外焦平面的研究, 有望在近期取得突破<sup>[2]</sup>。伴随着半导体材料技术和超大规模集成

电路工艺的发展, 非致冷型红外焦平面的规格 (单位面积像元数) 不断的扩大, 非致冷型红外焦平面在军民两用市场将得到进一步的推广应用<sup>[3,4]</sup>。

目前两类非致冷型红外焦平面比较有发展前途: 电阻测辐射热计焦平面和热释电焦平面。热释电红外焦平面由于需要机械式的斩光盘进行红外信号调制以及相应的调制驱动电路, 这就限制了其在体积和重量受限环境的应用<sup>[5]</sup>。氧化钒 (VO<sub>x</sub>) 微测辐射热计红外焦平面为电阻测辐射热计焦平面的一种, VO<sub>x</sub> 被用于非致冷型红外焦平面是由于它独特的电阻温度特性。

微测辐射热计红外焦平面性能很大程度上依赖于读出电路的结构以及功能。结构简单的读出电路意味着单位面积上更多像元数, 从而有效地提高空

间分辨率;读出电路的另一个非常关键的技术就是对噪声的抑制或削弱,以提高输出信号的信噪比.合理的降噪设计有利于微弱红外信号的提取和输出信号的进一步处理,也意味着更大温度分辨率<sup>[6~8]</sup>.

本文叙述的内容是:以 VO<sub>2</sub> 作为制作焦平面红外传感的基本材料,设计了一种结构简单且具有良好降噪功能的读出电路,该电路成功的应用于开发的 32×32 焦平面上.焦平面经测试表明具有良好低噪特性,具有进一步开发的潜能.

### 1 VO<sub>2</sub> 薄膜材料

VO<sub>2</sub> 用作制备微测辐射热计薄膜的基本材料,纯净的 VO<sub>2</sub> 材料相变温度为 68℃<sup>[9]</sup>.VO<sub>2</sub> 在相变过程中从低温相半导体向高温相金属相转变,晶体结构从单斜相四方结构转变.伴随着结构的变化,电阻将发生变化,但常温下 TCR/K<sup>-1</sup>较低.

适当地调整 VO<sub>2</sub> 薄膜制备工艺流程,可使 VO<sub>2</sub> 薄膜相变温度接近室温,并能控制所得 VO<sub>2</sub> 薄膜的在不同温度下的 TCR/K<sup>-1</sup>值<sup>[10]</sup>.我们通过改进工艺流程最终制备的 VO<sub>2</sub> 薄膜相变温度为 40℃左右,TCR/K<sup>-1</sup>在 25℃ 时可达 -0.02K<sup>-1</sup>.需要说明的是制备的 VO<sub>2</sub> 薄膜中含有一定的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的成份.严格说来,VO<sub>2</sub> 薄膜不仅仅只含有 VO<sub>2</sub>,而且还含有一定量的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 成份.

### 2 红外焦平面低噪 CMOS 读出电路的设计

微测辐射热计红外焦平面的噪声对焦平面的整体性能有很大的影响,在一定程度上决定着焦平面的温度分辨率.有一类噪声是由于外界环境的变化引起的,如环境的温度变化造成焦平面衬底的温度波动,衬底温度波动又会引起微测辐射热计的温度波动,结果是造成读出电路的部分输出噪声.一般用温控模块(如 TEC)实现微测辐射热计工作环境的稳定控制,但由于附加了温控模块,必然造成体积、重量、功耗开销的增加.而且高精度温控也不易实现.另一类噪声是由于读出电路器件本身固有的,如 MOS 管的 1/f 噪声、热辐射热计以及 MOS 管等的热噪声、读出电路电路不平衡造成的固定图形噪声.电路结构和电路工作方式也会引起噪声(如 KTC 噪声),它实质上是热噪声的一种<sup>[11]</sup>.以上两类噪声往往相互作用,增加整个焦平面的输出噪声.当红外信号较弱时,必须对噪声进行有效地抑制或削弱以提高输出信号的信噪比(S/N).

另外在设计读出电路时,选定的读出方式对应

的电路结构不宜过于复杂,复杂的电路一般需要较多数量的 MOS 管,这就造成单个像元读出电路占用较大的面积,不利于单位面积像元数的提高,从而降低了焦平面的空间分辨率.直接注入读出方式(DI)的电路结构简单,所需 MOS 管数量较少,适合大规模焦平面阵列,但由于 DI 结构下的像元偏置电压稳定性问题造成其不适合微弱红外信号的检测.所以对于微弱红外信号的情况下,要想采用 DI 读出方式,则必须对 DI 结构进行有效地改进.

针对上述问题所设计的 32×32 元焦平面读出电路结构示意图如图 1 所示.由于每个像元读出结构相同,所以电路只是简要地画出了 3 行 4 列读出电路结构示意图.该电路采用逐行扫描,逐列输出的工作模式.电路工作时,行选移位寄存器逐行选定一行行选开关导通,对应行的光生电流经行选开关积分到列共享积分放大器电容上,由列选开关依次选通输出.这样可以依次完成每一行的所有列输出,当所有行依次输出完毕后就形成一帧的红外图像信号的完整输出.

图 1 对应的单个像元具体读出电路如图 2 所示.该电路采用测辐射热计图 1 对应的单个像元具体读出电路如图 2 所示.该电路采用测辐射热计电流直接注入(BCDI)读出方式、电容跨导反馈放大器(CTIA)前放、相关双采样(CDS)的输出结构.其中 R<sub>d</sub> 为微测辐射热计,R<sub>b</sub> 为与 R<sub>d</sub> 对应的瞎元(不接受光照),R<sub>b</sub> 与无光照时的 R<sub>d</sub> 电阻相等且具有相

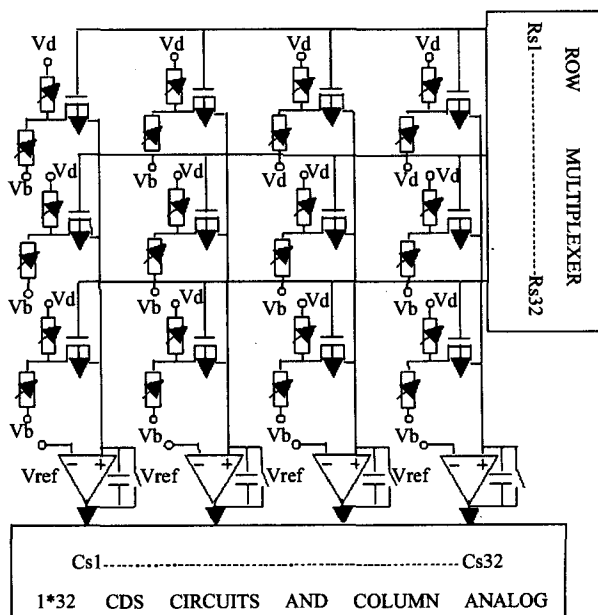


图 1 焦平面读出电路结构示意图  
Fig. 1 The schematic of readout circuit architecture

同的电阻温度特性,二者构成 BCDI 的关键部分;Rs 为行选 MOS 开关,Reset 为复位 MOS 管,积分电容 C<sub>int</sub>(值为 C/f)和低噪放大器 A 构成一 CTIA 结构列共享放大器;Mn1 管为源跟随器,Cs 为列选 MOS 开关,Mn2 和电容 C<sub>av</sub> 构成 CDS 电路,Mn3 为电容 C<sub>av</sub> 提供泻放回路。Mp1、Mp2、Mn4 和 Mn5 组成输出电压跟随器。

读出电路工作原理:行选开关 R<sub>s</sub> 导通时,当无红外光照在 R<sub>d</sub> 上时,由于 R<sub>b</sub> 电阻和 R<sub>d</sub> 电阻相等,且 R<sub>d</sub> 上的偏压(V<sub>d</sub>/V 与 V<sub>ref</sub>/V 之差)和 R<sub>b</sub> 上的偏压(V<sub>ref</sub>/V 与 V<sub>b</sub>/V 之差)相等,I<sub>int</sub>/A 为零,无电流积分到 C<sub>int</sub>;当有红外光照在 R<sub>d</sub> 上时,R<sub>d</sub> 电阻减小,偏压不变,积分电流 I<sub>int</sub>/A 不为零,电流积分到 C<sub>int</sub>,积分到一定时间 T<sub>1</sub>/s 后,CTIA 前放输出电压为

$$V_0 = V_{ref} - \frac{1}{C} \int_0^{T_1} I_{int} dt \quad (1)$$

取式(1)中等式右边最后一项为 V<sub>int</sub>/V,列选开关 C<sub>s</sub> 选通,同时 Clamp 上电平为高导通,C<sub>av</sub> 两端电压为

$$V1(T_1) = V_{ref} - V_{int} - V_{gs} \quad (2)$$

$$V2(T_1) = 0 \quad (3)$$

式(2)中 V<sub>gs</sub>/V 为 Mn1 的栅源级电压降.紧接着 T<sub>2</sub>/s 时刻,Reset 复位,同时 Clamp 上电平变低关断,C<sub>av</sub> 两端电压为

$$V1(T_2) = V_{ref} - V_{gs} \quad (4)$$

$$V2(T_2) = V1(T_2) - [V1(T_1) - V2(T_1)] \quad (5)$$

将式(2)、式(3)和式(4)代入式(5)可得

$$V2(T_2) = V_{int} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,输出信号 V<sub>2</sub>(T<sub>2</sub>)/V 为电流净积分电压信号。

图 2 中的焦平面读出电路工作时的主要驱动信号时序如图 3 所示.图中 Row Select 对应 R<sub>s</sub> 行选信号,Col. Select 对应 C<sub>s</sub> 列选信号,Col. Reset 对应列 Reset 复位信号.首先第一行行选信号 R<sub>s</sub> 选中后,在第 1 列选信号 C<sub>s</sub> 和复位信号 Reset 的作用下,积分电容 C<sub>int</sub> 先复位后积分,一定的积分时间后,第一列信号输出,之后依次是第 2 列至 32 列.32 列输出完毕,表示第一行信号输出结束;然后依次是第 2 行至 32 行,每一行输出的情况和第一行输出相同,32 行输出完毕,表示第一帧信号输出完毕;紧接着是下一帧输出,输出情况和第一帧相同,至 N 帧输出.从图中可以看出:每一行可分为两个时间段,行输出的有效时间段是后一个时间段;每一列要经过复位再积分一定时间后才能有效输出。

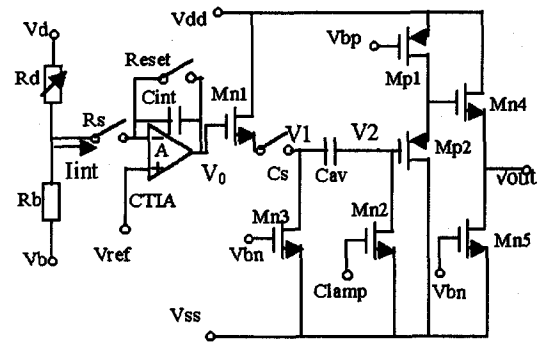


图 2 BCDI 读出方式、CTIA 前放、CDS 输出电路  
Fig. 2 The circuit of BCDI readout, CTIA preamplifier and CDS output

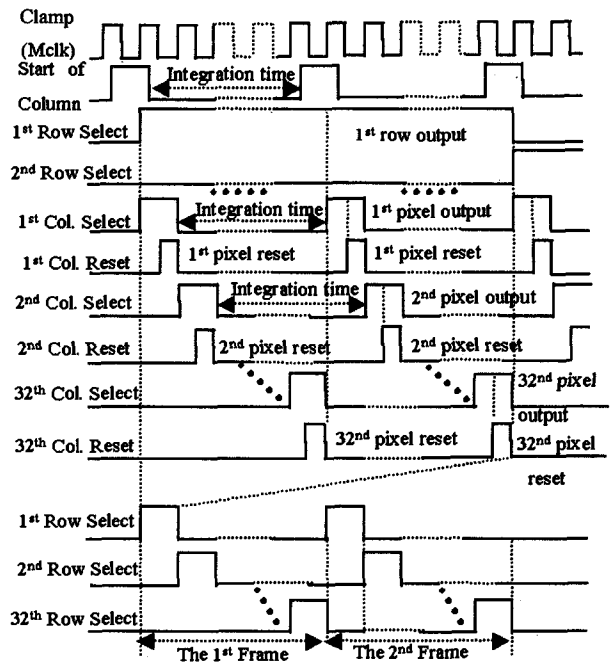


图 3 32 × 32 元读出电路主要驱动信号工作时序  
Fig. 3 The clock timing waveforms of main driving signals for 32 × 32 pixels UIRFPA

需要说明的是,图 3 中时序驱动信号必须在必要的偏压和其他一些时序配合下才能有效的驱动读出电路工作。

从图 2 中可以看出读出电路采用 BCDI 读出方式,单个像元所需电子器件很少,结构简单.且由于 BCDI 输出直接和列共享 CTIA 结构积分放大器相连,所以改读出电路具备 CTIA 读出方式的优点:高稳定的探测器偏置电压、高光子电流注入效益、高增益、高线性、低噪声等.所以该读出电路特别适合大规模红外焦平面阵列。

读出电路采用热电阻特性相同的 R<sub>d</sub> 与暗元 R<sub>b</sub> 对称读出结构,衬底温度波动引起的噪声可以有效

地削弱.当焦平面衬底环境温度波动时,Rd 和 Rb 电阻变化值相等,由于二者的偏压相等,所以电流变化值也相等,故温度波动引起的噪声对光生积分电流没有影响.

以二次采样时间  $T_2/s$  时刻为零点,CDS 电路的双采样函数可表示为

$$h(t) = \delta(t) - \delta(t - \tau) \quad (7)$$

式中  $\tau$  等于  $T_2 - T_1$ ,为双采样时间间隔.由拉普拉斯变换式(7)可变为

$$H(s) = 1 - \exp(-\tau s) \quad (8)$$

不考虑相位情况,(8)式对应的频域表示式为

$$H(f) = [2 - 2\cos(2\pi f\tau)]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

化简式(9)可得

$$H(f) = 2|\sin(\pi f\tau)| \quad (10)$$

由式(10)可得 CDS 电路增益频率响应曲线如图 4 所示.

由于  $\tau$  很小,低频噪声  $1/f$  噪声和 KTC 噪声的通频带远小于  $1/6\tau\text{Hz}$ ,从图 4 可以看出 CDS 电路则可以有效的削弱 CDS 电路前面的  $1/f$  噪声和 KTC 噪声;固定图形噪声在两次采样之后值几乎没有有什么变化,经 CDS 电路进行减法运算后,输出几乎为零,所以 CDS 电路又可以有效地抑制焦平面的固定图形噪声.

通过以上分析可见:所设计的读出电路结构简单,并且具备良好的低噪特性.

### 3 实际的 $32 \times 32$ 元 VO<sub>2</sub> 微测辐射热计焦平面及其测试

所设计的读出电路成功地应用于我们开发的  $32 \times 32$  元 VO<sub>2</sub> 红外焦平面上,读出电路集成在一  $6\text{mm} \times 6\text{mm}$  的硅片上,硅片内读出电路与表面二维的微测辐射热计阵列通过金属导体互连在一起.显微部分探测器单元图片如图 5 所示.图 5 中每个像元尺寸为  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ ,像元间距  $10\mu\text{m}$ ,像元上 VO<sub>2</sub> 薄膜感光面尺寸  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ .

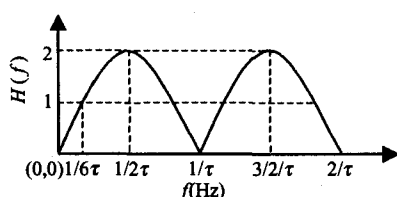


图 4 CDS 电路的增益频率响应曲线

Fig. 4 The gain versus frequency for CDS

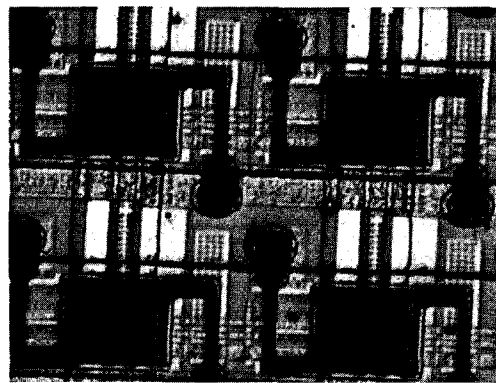


图 5 焦平面部分阵列显微照片

Fig. 5 The microscope picture of part bolometric detector array

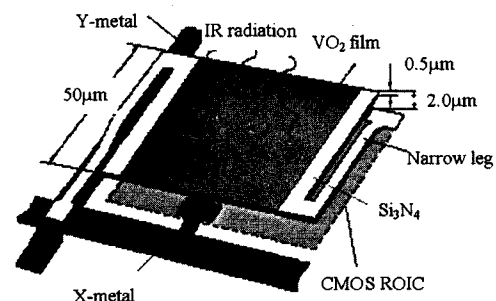


图 6 单个微测辐射热计像元结构

Fig. 6 The schematic structure of individual microbolometer

单个像元采用了标准的微桥结构<sup>[12,13]</sup>,单个像元的结构示意图如图 6 所示.从图 6 中可以看出,每个微测辐射热计单元包括一个  $0.5\mu\text{m}$  厚的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微桥结构,该微桥由 2 个  $2.0\mu\text{m}$  高的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  细腿支撑,在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微桥的正中央表面是一厚度为  $500\text{\AA}$  的  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  VO<sub>2</sub> 薄膜方块,像元细腿由金属连线和下面硅片中的读出电路连在一起.红外光投射到 VO<sub>2</sub> 薄膜方块时,薄膜吸热导致电阻变化,通过和微桥细腿相连的读出电路则可以将这一电阻变化转化成电压信号而输出.

本文针对自行研制的  $32 \times 32$  元红外焦平面搭建了一套完整的测试系统,对焦平面进行了测试,详细的测试方法将另文发表,根据测试结果总结所得焦平面部分特征参数如下:

1. 帧频:  $50\text{Hz}$ ;
2. 响应光谱范围:  $8 \sim 14\mu\text{m}$ ;
3. 像元电阻:  $20\text{K}\Omega$ ;
4. 输出噪声:  $1\text{mV RMS}$ ;
5.  $\text{NETD}@ f/1, 50\text{Hz}$ :  $50\text{mK}$ ;
6. 芯片功耗: 小于  $30\text{mW}$ ;

7. 工作温度:23℃ - 26℃.

从上述系列参数可见,焦平面具有良好的低噪特性,测试结果同时说明读出电路设计是成功的.

#### 4 结语

本文以 VO<sub>2</sub> 作为微测辐射热计的薄膜材料,设计的读出电路结构简单,理论分析表明可以有效地抑制环境温度波动噪声、1/f 噪声、KTC 噪声、固定图形噪声等,具有优秀的低噪特性. 读出电路成功地实际应用于 32 × 32 元的 UIRFPAs 上. 焦平面测试表明具有良好的低噪性能,具备进一步开发的潜力.

#### REFERENCES

- [1] Gallo M A, Willits D S. Low cost uncooled IR sensor for battlefield surveillance [C]. *Infrared Technology XIX*, SPIE, 1993, **2020**: 351—358.
- [2] Murphy D, Kennedy A, Ray M, *et al.* Resolution and sensitivity improvements for VO<sub>x</sub> microbolometer FPAs [C]. *Infrared technology and applications XXIX*, SPIE, 2003, **5074**: 402—413.
- [3] Bell W A, Glasgow B B. On the next generation of imaging infrared seekers for anti-aircraft missiles [C]. *Soc. Opt. Eng.*, SPIE, 1998, **3377**: 220—230.
- [4] Chatard J, Tribolet P. Sofradir IR detectors today and tomorrow [C]. *Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Devices II*, SPIE, 1998, **3553**: 37—47.
- [5] Hanson C. Uncooled thermal imaging at texas instruments [C]. *Infrared Technology XIX*, SPIE, 1993, **2020**: 330—340.
- [6] Kang G K, Woo D H, Lee H C. Multiple integration method for a high signal-to-noise ratio readout integrated Circuit [J]. *IEEE Trans. Analog and Digital Signal Processing*, 2005, **52**(9): 553—557.
- [7] Woo D H, Kang G K, Lee H C. Novel current-mode background suppression for 2-D LWIR applications [J]. *IEEE Trans. Analog and Digital Signal Processing*, 2005, **52**(9): 606—610.
- [8] Tanzer M, Graupner A, Schuffny R. Design and evaluation of current-mode image sensors in CMOS [J]. *IEEE Trans. Analog and Digital Signal Processing*, 2004, **51**(10): 566—570.
- [9] Chen S, Yi X, Ma H, *et al.* A novel structural VO<sub>2</sub> micro-optical switch [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2003, **35**(15): 1351—1355.
- [10] WANG Hong-Chen, YI Xin-Jian, CHEN Si-Hai, *et al.* Fabrication of vanadium oxides polycrystalline thin film for uncooled IR detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王宏臣, 易新建, 陈四海, 等. 非致冷红外探测器用氧化钒多晶薄膜的制备. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(1): 64—66.
- [11] LIU Cheng-Kang, YUAN Xiang-Hui, ZHANG Xiao-Fei. Fixed pattern noise and suppression in CMOS ROIC [J]. *Semiconductor Optoelectronics* (刘成康, 袁祥辉, 张晓飞. CMOS 读出电路中的噪声及抑制. *半导体光电*), 2001, **23**(3): 170—172.
- [12] Jerominek H, Renaud M, Swart N R, *et al.* Micromachined VO<sub>2</sub>-based uncooled bolometric detector arrays with integrated CMOS readout electronics [C]. *Micromachined Devices and Components II*, SPIE, 1996, **2882**: 11—21.
- [13] WANG Hong-Chen, YI Xin-Jian, CHEN Si-Hai, *et al.* Fabrication of 128-element uncooled VO<sub>x</sub> thermal IR detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王宏臣, 易新建, 陈四海, 等. 128 元非致冷氧化钒红外探测器的制作. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 99—102.