

# 基于 VO<sub>2</sub> 薄膜非致冷红外探测器光电响应研究

陈长虹 易新建 熊笔锋

(华中科技大学光电工程系, 武汉 430074)

(2000 年 6 月 12 日收到, 2000 年 7 月 25 日收到修改稿)

VO<sub>2</sub> 薄膜是非致冷微测辐射热红外探测器热敏电阻材料. 研究中应用微电子工艺制备了 VO<sub>2</sub> 溅射薄膜红外探测器, 在 296K 的环境中测试了该探测器在不同的直流偏置、光调制频率下对 873K 标准黑体源 8—12 $\mu$ m 红外辐射的光电响应以及器件的噪声电压. 在 10 和 30Hz 的调制频率下其响应率分别大于 17kV/W 和接近 10kV/W. 该探测器实现了探测率  $D^*$  大于  $1.0 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ , 热时间常量为 0.011s 的 8—12 $\mu$ m 非致冷红外探测.

关键词: 非致冷测辐射热探测器, 红外探测器, 二氧化钒, 薄膜

PACC: 0720, 0762, 8160B, 7360

## 1 引 言

二十世纪 80 年代, 低温致冷型二维红外焦平面阵列的发展以及固体红外热像仪的出现, 大大提高了红外成像的技术水平, 以至该类产品的技术性能满足于航空、航天以及红外夜视等军事敏感领域中的技术需求, 从而扩大了该类产品在军事尖端领域中的应用. 进入二十世纪 90 年代, 非致冷红外焦平面技术取得了重要突破并达到实用化, 与致冷型红外热像仪相比, 它在低成本、低功耗、长寿命、小型化和可靠性等方面都具有明显的优势, 在军事以及部分民用领域已获得重要的应用, 并在广阔的民用领域显示出巨大的市场潜力, 成为当今热成像技术中最引人注目的突破之一.

由美国 Honeywell 技术中心以及 Amber 公司<sup>[1, 2]</sup>领先的 320 × 240 VO<sub>2</sub> 微测辐射热红外焦平面阵列已引起世人瞩目, 国内对这一领域或相近领域的研究才刚刚起步<sup>[3, 4]</sup>. 本文在制备 VO<sub>2</sub> 溅射薄膜的基础上, 应用微电子工艺制备了 8 元线列 VO<sub>2</sub> 红外探测器, 在 296K 的环境中测试了该探测器在不同的直流偏置以及光调制频率下对 873K 的标准黑体源 8—12 $\mu$ m 红外辐射的光电响应.

## 2 器件的红外响应理论

探测器的黑体响应率是指探测器输出电信号的基频电压的均方根值  $V_s$  (开路) 或基频电流的均方

根值 (短路) 与入射功率的基频分量的均方根值  $P$  之比, 表达式为

$$\mathcal{R}_{bb} = \frac{V_s}{P}. \quad (1)$$

黑体的辐射亮度  $L$ 、有效发射率  $\epsilon$ 、绝对温度  $T$ , 当其光阑孔直径为  $D$ , 且光阑至被测探测器之间的距离为  $d$ . 在绝对温度  $T_0$  的环境中, 入射到标称面积  $A_n$  的探测器上的净辐射功率为

$$P = \chi \pi (L - L_0) A_n \left( \frac{D}{2d} \right)^2, \quad (2)$$

式中  $\chi$  为调制因子, 对于基频分量的均方根值, 有  $\chi = \sqrt{2}/\pi$ ;  $L_0$  为环境的辐射亮度. 根据 Planck 辐射定律 ( $L - L_0$ ) 的表达式为

$$L - L_0 = 2hc^2 \epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi_{\lambda} \left( \frac{1}{\exp(hc/kT\lambda)} - 1 \right) - \frac{1}{\exp(hc/kT_0\lambda)} - 1 \right) \frac{d\lambda}{\lambda^5}, \quad (3)$$

式中  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光速;  $k$  为玻耳兹曼常量;  $\lambda_2, \lambda_1$  分别为辐射波段的上下限波长;  $\xi_{\lambda}$  为窗口材料对波长  $\lambda$  的透过率函数.

测辐射热探测器的黑体响应率与偏置电流以及调制频率的关系为<sup>[5, 6]</sup>

$$\mathcal{R}_{bb} = \frac{|\alpha| \epsilon_b I R_b R_L}{G (R_b + R_L) \sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}}, \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为电阻温度系数  $TCR$ , 定义  $\alpha = (1/R_b) (dR_b/dT)$ ;  $\epsilon_b$  为探测器的发射率;  $I$  为偏置电流;  $R_b$  为探测器的电阻;  $R_L$  为负载电阻;  $G$  为探测器的热导;  $f$  为辐射信号的调制频率;  $\tau$  为探测器的热

时间常量,定义  $\tau = C/G$ ,其中  $C$  为热容.

### 3 实验结果与讨论

应用微电子工艺把 VO<sub>2</sub> 溅射薄膜制备成截面如图 1 所示的探测器,光敏面为  $10\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , Ni-Cr 膜与 Au 膜为欧姆接触层,探测器阻值为  $400\ \text{k}\Omega$ . 黑体响应率的测试系统如图 2 所示,探测器光敏面的法线与辐射信号入射方向的夹角小于  $10^\circ$ ,黑体温度为  $(873 \pm 0.1)\text{K}$ ,环境温度为  $296\text{K}$ ,光阑孔的直径为  $5\ \text{mm}$ ,光阑孔与被测探测器的距离为  $75\ \text{mm}$   $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  的光谱透射窗口. 调节负载电阻使其与探测器阻值相等.

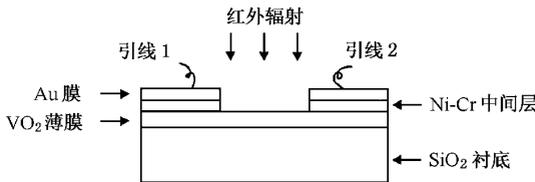


图 1 探测器的截面图

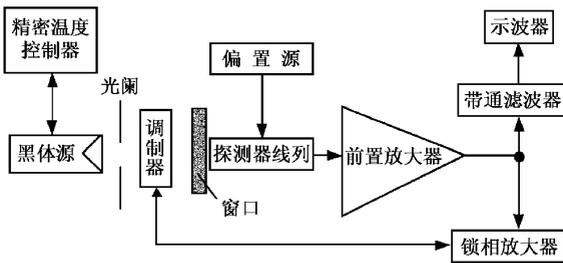


图 2 测试系统原理图

在不同的直流偏置条件下,探测器的黑体响应率与调制频率的关系如图 3 所示. 由于调制器的限制,频率低于  $8\ \text{Hz}$  的响应未能测出. 结果显示,在相同的直流偏置下随着辐射信号调制频率的增大,而黑体响应率减小,黑体响应率与调制频率的关系与 (4) 式的理论结果相一致. 把黑体响应率与调制频率关系的测试结果按照 (4) 式的函数关系进行曲线拟合<sup>[6]</sup>,热时间常量的最佳拟合结果为  $0.011\ \text{s}$ .

调制频率相同时,探测器的黑体响应率与直流偏置电流的关系如图 4 所示. 结果显示,当偏置电流等于临界值时,探测器的黑体响应率为最大. 当辐射信号的调制频率为  $10$  和  $30\ \text{Hz}$  时其最大响应率分别大于  $17\ \text{kV/W}$  和接近  $10\ \text{kV/W}$ . 当偏置电流小于

临界值时,响应率与偏置电流呈近似线性关系;当偏置电流大于临界值时,响应率随着偏置电流的增大反而减小. 其原因是随着偏置电流的增大,探测器所消耗电功率随之增大,这样引起 VO<sub>2</sub> 薄膜温度升高,VO<sub>2</sub> 薄膜温度的升高又引起其电阻温度系数的减小,最终导致黑体响应率的降低. 同时,调制频率为  $30\ \text{Hz}$  所对应的临界偏置电流略大于  $10\ \text{Hz}$  所对应的临界偏置电流,在不同的调制频率下每一个辐射周期所引起 VO<sub>2</sub> 薄膜温度升高的不同,这一结果同样由 VO<sub>2</sub> 薄膜电阻温度系数的变化得到解释.

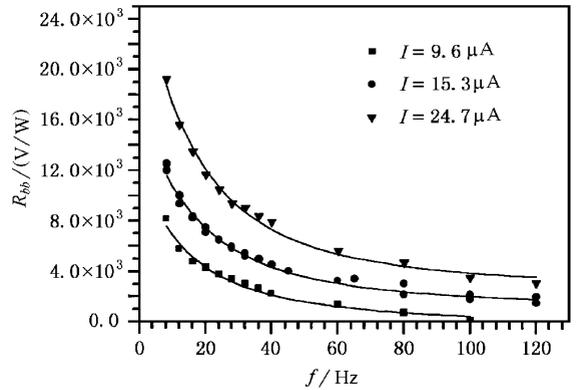


图 3 直流偏置对应的黑体响应率  $R_{bb}$  与调制频率  $f$  的关系

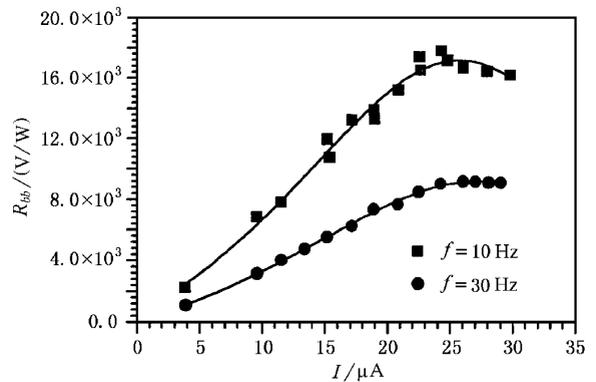


图 4 黑体响应率  $R_{bb}$  与直流偏置电流  $I$  的关系

按 GB/T 13584-92 红外探测器参量测试方法进行探测器的噪声测试. 频率分别为  $10, 30\ \text{Hz}$  时,且在不同的直流偏置电流下探测器单位带宽噪声的均方根电压如图 5 所示.

以上测试结果是对该行列探测器中任意选取的某一单元探测器进行测试后所得到的,按照探测率  $D^*$  值计算公式来计算,当辐射信号的调制频率分别为  $10$  和  $30\ \text{Hz}$  时,该探测器对  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  红外辐

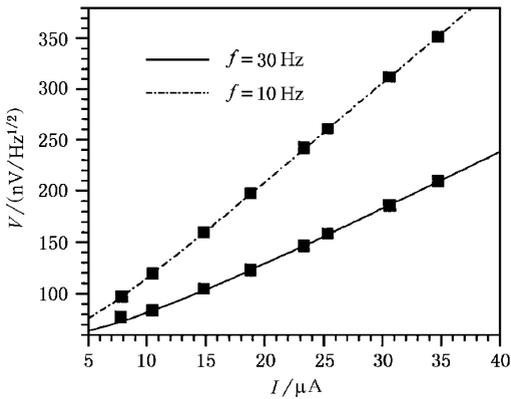


图5 单位带宽噪声均方根电压  $V$  与直流偏置电流  $I$  的关系

射的探测率  $D^*$  值分别为  $2.30 \times 10^8$  和  $1.89 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ . 通过对该线列探测器其余七单元分别进行以上的测试和计算,证实该线列探测器每单元之间探测率的非均匀性误差小于 20%.

## 4 结 论

当辐射信号的调制频率为 10 和 30 Hz 时其响应率分别大于 17 kV/W 和接近 10 kV/W. 通过探测器对 8—12  $\mu\text{m}$  红外辐射的探测率  $D^*$  值计算,证实该探测器可以实现  $D^*$  大于  $1.0 \times 10^8 \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ , 热时间常量  $\tau = 0.011 \text{ s}$  的 8—12  $\mu\text{m}$  非致冷红外探测.

- [ 1 ] R. J. Herring, P. E. Howard, *Proc. SPIE*, **2746** (1996) 2.  
 [ 2 ] H. Jerominek, F. Picard, N. R. Swart *et al.* *Proc. SPIE* **2746** (1996) 60.  
 [ 3 ] Jing-zhong Cui *et al.*, *Acta Physica Sinica* **47**(1998) 454 (in Chinese) [ 崔敬忠等 物理学报 **47**(1998) 454 ]

- [ 4 ] Yan-song Chen *et al.*, *Acta Physica Sinica* **47**(1998) 1378 (in Chinese) [ 陈岩松等 物理学报 **47**(1998) 1378 ]  
 [ 5 ] K. C. Liddiard, *Infrared Phys.* **24**(1984) 57.  
 [ 6 ] S. Sedky, P. Fiorini, K. Baert *et al.*, *IEEE Trans. Electron Devices* **46**(1999) 675.

## INFRARED RESPONSIVITY OF UNCOOLED VO<sub>2</sub>-BASED THIN FILMS BOLOMETER

CHEN CHANG-HONG YI XIN-JIAN XIONG BI-FENG

(*Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 12 June 2000; revised manuscript received 25 July 2000)

### ABSTRACT

VO<sub>2</sub> thin films are used for uncooled microbolometer due to their high temperature coefficient of resistance. In this paper on the basis of fabricating the uncooled bolometer based on VO<sub>2</sub> sputtered thin films, the responsivity for the spectral range of 8–12  $\mu\text{m}$  region dependence on bias current and chopper frequency is studied. The result indicates that the responsivity is over 17 kV/W and up to 10 kV/W at a chopper frequency of 10 and 30 Hz, respectively. The device having a detectivity  $D^*$  of exceeding  $1.0 \times 10^8 \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$  and a thermal time constant of 0.011 seconds has been realized.

**Keywords**: uncooled bolometer, infrared detector, vanadium dioxide, thin films

**PACC**: 0720, 0762, 8160B, 7360