

# 基于 VO<sub>2</sub> 薄膜非致冷红外探测器性能研究\*

陈长虹 易新建 张 静 熊笔峰

(华中科技大学光电工程系, 湖北, 武汉, 430074)

**摘要** 用微电子工艺制备了 VO<sub>2</sub> 溅射薄膜红外探测器, 在 296K 的环境温度中测试了该探测器对 8—12μm 红外辐射的黑体响应率和噪声电压, 结果显示该探测器在调制频率为 30Hz 时可以实现探测率  $D^* = 1.89 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ , 热时间常数  $\tau = 0.011\text{s}$  的非致冷红外探测。

**关键词** 测辐射热探测器, 红外, 二氧化钒, 探测率, 响应率。

## CHARACTERIZATION OF UNCOOLED VO<sub>2</sub>-BASED THIN FILMS BOLOMETER\*

CHEN Chang-Hong YI Xin-Jian ZHANG Jing XIONG Bi-Feng

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

**Abstract** An uncooled bolometer based on VO<sub>2</sub> thin films deposited by reactive ion-beam sputtering was fabricated. The noise and responsivity for the spectral range 8—12μm were measured at 296K. At the chopper frequency of 30Hz, the device having a detectivity  $D^*$  of  $1.89 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$  and a thermal time constant of 0.011s was realized.

**Key words** bolometer, infrared, vanadium dioxide, detectivity, responsivity.

### 引言

20 世纪 90 年代中期红外探测技术发生了第二次革命, 发展了室温工作的红外焦平面阵列, 它克服了由低温致冷红外探测技术所带来的很多缺点, 室温红外焦平面技术的发展, 将推动红外热像仪由低温致冷型向室温非致冷型、高价型向廉价型转变, 其结果将扩大该产品在军事及民用领域中的应用。

VO<sub>2</sub> 薄膜在室温下的电阻温度系数为  $-0.02 \text{K}^{-1}$ , 所制备的测辐射热探测器的  $1/f$  噪声比同等条件下 YBaCuO 超导薄膜器件低一个数量级<sup>[1]</sup>, 且能够与 Si 半导体工艺兼容, 由美国 Honeywell 技术中心以及 Amber 公司<sup>[2,3]</sup> 领先的  $320 \times 240$  或  $336 \times 240$  元 VO<sub>2</sub> 微测辐射热红外焦平面阵列已引起世人瞩目, 国内对这一领域的研究才刚刚起步, 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 的环境温度

中测试了该探测器对 8—12μm 红外辐射的黑体响应率以及噪声电压, 结果显示该探测器在调制频率为 30Hz 时可以实现探测率  $D^* = 1.89 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ , 热时间常数  $\tau = 0.011\text{s}$  的非致冷红外探测。

### 1 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  $V_r$  (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

$$R_m = \frac{V_r}{P} \quad (1)$$

黑体的辐射亮度  $L$ 、有效发射率  $\epsilon$ 、绝对温度  $T$ 、当其光栏孔直径为  $D$ , 且光栏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

\* 国家高技术 863 基金资助项目

稿件收到日期 2000-06-06, 修改稿收到日期 2000-11-05

\* The project supported by the National High Technology 863 Program

Received 2000-06-06, revised 2000-11-05

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

式(2)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

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

式(3)中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $\lambda_0, \lambda_1$  分别为辐射波段的上下限波长,  $\xi_\lambda$  为窗口材料对波长  $\lambda$  光波的透过率函数.

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>[4,5]</sup>

$$R_{bb} = \frac{|a|\epsilon_b IR_b R_L}{G(R_b + R_L) \sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}}, \quad (4)$$

式(4)中  $a$  为电阻温度系数 TCR, 定义  $a = (1/R_b)(dR_b/dT)$ ;  $\epsilon_b$  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数, 定义  $\tau = C/G$ , 其中  $C$  为热容.

探测器单位带宽噪声的均方根电压为  $V_n$ , 则探测率  $D^*$  的表达式为

$$D^* = \frac{R_{bb}}{V_n} \sqrt{A_n}. \quad (5)$$

### 2 探测器的制备与性能测试

应用微电子工艺把厚度为 200nm 的 VO<sub>2</sub> 溅射薄膜制备成单元器件结构如图 1 所示的 8 元线列探测器. VO<sub>2</sub> 溅射薄膜作为探测器光敏面的热敏电阻. 单元探测器光敏面的面积为 10 × 100 μm<sup>2</sup>, Ni-Cr 膜与 Au 膜作为欧姆接触层, 在室温时探测器阻值为 400kΩ. 其中, 作为中间层的 Ni-Cr 膜的厚度为 50nm, Au 膜的厚度若 500nm. 测试过程中, 把标准黑体的温度调节为 873K, 环境温度为 296K. 由黑体

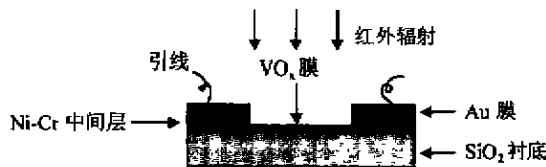


图 1 VO<sub>2</sub> 非致冷测辐射热探测器的结构图  
Fig. 1 Structure diagram of VO<sub>2</sub> uncooled bolometer

输出的红外辐射经过 8-12 μm 的红外透过窗口后入射到探测器的光敏面上, 调节探测器光敏面与黑体红外辐射的入射方向的夹角, 使探测器光敏面的法线与红外辐射入射方向的夹角小于 10°. 黑体光阑孔的直径为 5mm, 光阑孔与被测探测器的距离调节为 75mm. 调节负载电阻使其与探测器阻值相等.

### 3 结果与讨论

在不同的直流偏置条件下, 探测器的黑体响应率与红外辐照的调制频率的关系如图 2 所示. 由于调制器的限制, 频率低于 8Hz 的响应未能测出. 由图 2 中探测器的黑体响应率与调制频率的关系结果显示, 在相同的直流偏置下随着辐射信号调制频率的增大, 黑体响应率减小, 且黑体响应率与调制频率的关系与式(4)的理论结果相一致. 采用曲线拟合的方法, 热时间常数的计算结果为 0.011s.

通用调制频率为 30Hz. 探测器的单位带宽噪声电压的均方根值与直流偏置电流的关系如图 3 所

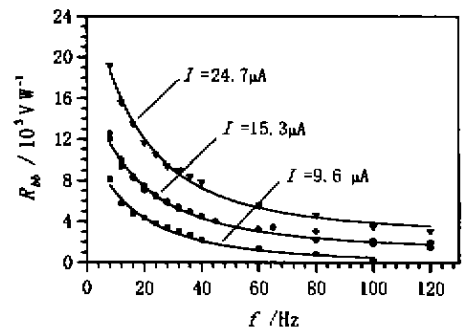


图 2 不同直流偏置电流对应的黑体响应率与调制频率的关系  
Fig. 2 Blackbody responsivity dependence on chopper frequency at different DC bias current

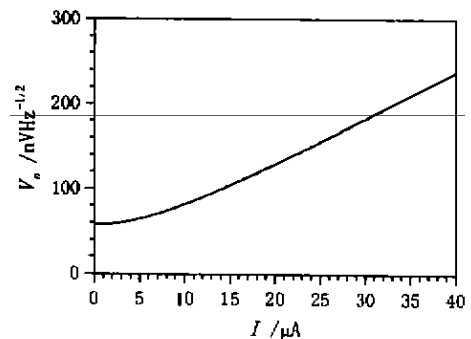


图 3 单位带宽噪声的均方根电压与直流偏置电流的关系  
Fig. 3 RMS noise voltage dependence on DC bias current

示. 探测器的黑体响应率、探测率与直流偏置电流的关系如图 4 所示, 图 4 中所示的黑体响应率、探测率与直流偏置电流的变化关系结果显示, 当偏置电流小于临界值时, 响应率随着偏置电流的增大而增大, 且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, 其原因是由于探测器所消耗电功率随着偏置电流的增大而增大, 这样引起  $\text{VO}_2$  薄膜热敏电阻温升的增加, 最终导致  $\text{VO}_2$  薄膜的电阻温度系数的减小所致. 且在偏置电流为  $20\mu\text{A}$  附近时, 其探测率为最大, 最大值为  $1.89 \times 10^5 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ .

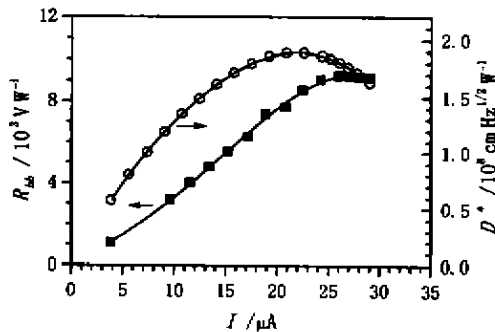


图 4 黑体响应率、探测率与直流偏置电流的关系

Fig. 4 Blackbody responsivity and detectivity dependence on DC bias current

#### 4 结语

当红外辐照的调制频率为  $30\text{Hz}$  时, 通过该探测器对  $8-12\mu\text{m}$  红外辐射的黑体响应率、噪声电压的测试以及探测率  $D^*$  值的计算, 证实该探测器可以实现探测率  $D^*$  为  $1.89 \times 10^5 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、热时间常数  $\tau = 0.011\text{s}$  的  $8-12\mu\text{m}$  红外波段的非致冷红外探测。

#### REFERENCES

- [1] Jahanzeb A, Travers C M, Celik-Butler Z. A semiconductor  $\text{YBaCuO}$  microbolometer for room temperature IR imaging. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1997, **44**: 1795-1801
- [2] Herring R J, Howard P E. Design and performance of the ultra  $320 \times 240$  uncooled focal plane array and sensor. *SPIE*, 1996, **2746**: 2-12
- [3] Jerominek H, Picard F, Swart N R, et al. Micromachined uncooled  $\text{VO}_2$ -based IR bolometer arrays. *SPIE*, 1996, **2746**: 60-71
- [4] Liddiard K C. Thin-film resistance bolometer IR detectors. *Infrared Phys.*, 1984, **24**: 57-64
- [5] Sedky S, Fiorini P, Baert K, et al. Characterization and optimization of infrared poly  $\text{SiGe}$  bolometers. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1999, **46**: 675-681