

文章编号:1001-9014(2004)02-0099-04

128元非致冷氧化钒红外探测器的制作

王宏臣^{1,2} 易新建^{1,2}, 陈四海², 黄光² 肖静^{1,2}

(1. 华中科技大学激光国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用新工艺在氮化硅衬底上制备了室温时电阻温度系数为 -0.021K^{-1} 的氧化钒薄膜, 以此为基础, 利用光刻和反应离子刻蚀工艺在硅衬底上制作了128元氧化钒红外探测器. 为了降低探测器敏感元与衬底间的热导, 设计制作了自支撑的微桥结构阵列. 测试结果显示探测器的响应率和探测率在 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的长波红外波段处分别达到 10^4V/W 和 $2\times 10^8\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

关键词 红外探测器; 微桥结构; 微桥阵列; 非致冷; 氧化钒薄膜

中图分类号: TN215; O484.1 **文献标识码**: A

FABRICATION OF 128-ELEMENT UNCOOLED VO_x THERMAL IR DETECTORS

WANG Hong-Chen^{1,2}, YI Xin-Jian^{1,2}, CHEN Si-Hai², HUANG Guang², XIAO Jing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Optoelectronic Engineer, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A new method fabricating Vanadium oxides thin films on Si_3N_4 substrates has been completed, and the temperature coefficient resistance of the thin film has been found to be -0.021K^{-1} at room temperature. Based on the method, 128-element linear uncooled infrared detector arrays are fabricated utilizing pattern and reactive ion etching process. Self-supporting microbridge array has also been designed and fabricated to reduce the thermal conductance between the active area of detectors and the silicon substrate. Test indicates the responsivity and detectivity of detectors approaching 10^4V/W and $2\times 10^8\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ in $8\sim 12\mu\text{m}$ IR radiation band, respectively.

Key words IR detectors; microbridge structure; microbridge arrays; uncooled; vanadium oxides thin film

引言

非致冷红外探测器的工作过程一般可以分为二步: 首先, 探测器的光敏区吸收外界入射的红外辐射能并引起自身温升, 然后, 光敏区将自身温度的变化转变为某种物理、化学或者电学特性的变化并由外围检测系统探测^[1]. 理论上热探测器能够探测任意波长的辐射能量, 可以在微波到 X 射线很宽的电磁波频带内工作. 热探测器可以在室温下工作, 无需制冷器, 可进一步降低成像系统的体积和功耗, 减少系统成本, 因而热探测器在诸如武器瞄准、导弹制导、公安消防、工业监控、医疗卫生和汽车自动驾驶等军事和民用领域具有广阔的商业需求和应用前景^[2].

非致冷红外探测器是通过感应入射的红外辐射能来探测红外信号的, 多种材料都可以用作热探测器的热敏材料, 如金属薄膜, 非晶硅, 高温超导薄膜以及氧化钒薄膜^[3-5]. 以 V^{3+} 、 V^{4+} 、 V^{5+} 等离子组成的多晶混合相氧化钒薄膜在室温时的电阻温度系数为 -0.02K^{-1} , 大约是金属薄膜的 5~10 倍, 对 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的长波红外具有较大的吸收系数, 可以获得较低的 $1/f$ 噪声, 成为目前制作测微辐射热传感器热敏电阻的理想材料^[6-8].

1 氧化钒薄膜制备

制备氧化钒薄膜通常采用反应离子溅射技术, 即在离子溅射镀膜的过程中通入反应气体, 溅射出

收稿日期: 2003-08-17, 修回日期: 2003-12-29

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60106003)

作者简介: 王宏臣 (1979-), 男, 河南新乡人, 华中科技大学博士生, 主要从事非致冷红外探测器和 MOMES 微型光机电系统的研究.

Received date: 2003-08-17, revised date: 2003-12-29

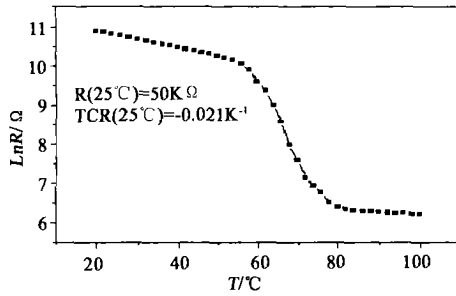


图1 氧化钒薄膜的电阻温度曲线

Fig.1 Resistance versus temperature curve for vanadium oxides thin film

的钒离子与氧气发生反应,直接在衬底上形成氧化钒薄膜.在离子溅射过程中,所需反应气体的流量与离子束能量、束流密度、衬底温度等多种因素有关,因此在制备氧化钒薄膜时需要对反应气体的流量精确控制,工艺难度较大,工艺重复性也较差.本文采用了一种改进的离子束溅射镀膜的工艺来解决这些问题,新工艺与传统工艺的主要区别是在离子束溅射镀膜的过程中不通入反应气体,因而在衬底上制备的不是氧化钒薄膜,而是金属钒膜.随后利用氧化炉对所制备的金属钒膜进行氧化和后退火,生成氧化钒薄膜.新工艺虽然比传统工艺多了一道工序,但在溅射镀膜时无需对气流精确控制,而且后退火工艺可以弥补薄膜的部分缺陷,提高薄膜的电阻均匀性,减少薄膜的内在噪声.新工艺的工艺温度可以控制在400°C以下,与CMOS集成电路工艺兼容.

所制备的氧化钒薄膜厚度为50nm.采用探针法对制备在氮化硅衬底上的氧化钒多晶薄膜进行了电学性能测量,在25°C时薄膜方块电阻为50KΩ.利用数控热板和四探针电阻率测量系统测量了VO_x薄膜在不同温度下的方块电阻,测试曲线如图1所示,从图中可以计算出薄膜的电阻温度系数.测试和计

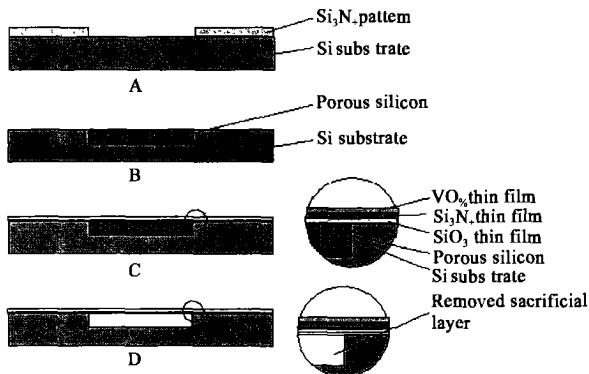


图2 微桥结构制作工艺

Fig.2 Fabrication sequences for microbridge structure

算结果表明薄膜的电阻温度系数在室温时为 -0.021K^{-1} ,电阻均匀性在 $20 \times 20\text{mm}^2$ 范围内优于5%.

2 带微桥结构的多元探测器制作

非致冷红外探测器是通过探测器敏感元吸收红外辐射后薄膜的温升来反应入射的红外辐射大小的,在恒定的红外辐射条件下,薄膜温升越大,探测器的灵敏度越高.探测器敏感元吸收红外辐射后的温升与探测器与衬底之间的热导成反比.因此要提高红外探测器的探测灵敏度,必须降低探测器与衬底之间的热导.试验中探测器与衬底间的低热导结构是通过利用多孔硅牺牲层工艺在Si衬底上制作悬浮微桥结构实现的.微桥悬浮在多孔硅牺牲层去除后形成的微沟道之上,通过桥腿与衬底连接.利用微桥结构可以有效降低探测器的光敏区与衬底之间的接触面积,减少探测器与衬底之间的热导,作为探测器热敏材料的氧化钒薄膜就制备在悬浮微桥结构之上.带悬浮微桥结构的多元探测器的制作工艺过程如图2所示,并描述如下:

A) 定义多孔硅区域,在Si衬底上利用PECVD生长一层氮化硅薄膜作为保护层,然后利用光刻和反应离子刻蚀去除欲形成多孔硅区域的氮化硅保护层,露出Si衬底.

B) 利用电化学腐蚀工艺制备多孔硅,多孔硅制备液为HF和乙醇的1:1混合液,制备时的阳极氧化电流密度为 $50\text{mA}/\text{cm}^2$,腐蚀时间为1min,台阶测试表面所制备的多孔硅的厚度约为 $3\mu\text{m}$,随后去除氮化硅掩膜层.

C) 采用离子束镀膜淀积结构层和氧化钒薄膜.先在衬底和多孔硅层上制备一层厚度为 $0.3\mu\text{m}$ 的SiO₂缓冲层薄膜,然后在SiO₂薄膜上再生一层 $0.5\mu\text{m}$ 的氮化硅薄膜层,最后,在氮化硅层之上采用改进的离子束溅射和氧化工艺制备氧化钒薄膜.

D) 去除牺牲层,微结构悬浮.利用微电子工艺先在薄膜上制作探测器图形和读出电极,随后用浓度为1%KOH的多孔硅腐蚀液侧向腐蚀多孔硅牺牲层,微桥结构悬浮.

由于探测器的光敏区与衬底不接触,这就减少了探测器与衬底之间的热导,有利于提高探测器的红外探测性能,图3为去除底部多孔硅牺牲层后的微桥结构的扫描电镜照片,从图中可以较清楚地看到多孔硅牺牲层去除后所形成的微沟道和悬浮在沟道之上的微桥结构.利用上述工艺制作的多元探测器为128元

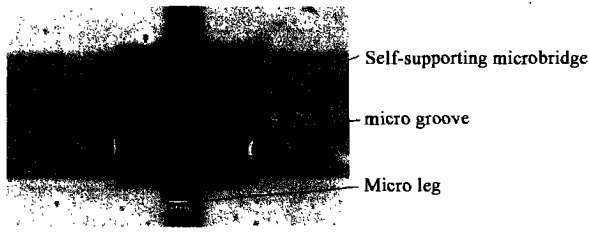


图3 微桥结构的扫描电镜照片

Fig. 3 The microphotography of the microbridge

线阵结构,探测器的结构参数如表1所列。

3 探测器性能测试

参照国标 GB/T13584-92 中规定的红外探测器参数测试办法对所制作的 128 元探测器的性能参数进行了测试。测试中采用的电源为内阻很小的干电池,输出信号和噪声经 EG&G5209 锁相放大器锁相放大后,由高精度数字电压表读出。由精密温度控制电路所控制的标准风冷黑体输出的红外辐射经斩光盘调制后,通过 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外窗口入射到多元红外探测器上,黑体温度和斩光盘调制频率均可调。测试过程中黑体温度为 500K,斩光盘调制频率为 30Hz。噪声测试中的频率参考信号是由位于锁相放大器内的信号发生器提供的。

探测器典型像元的黑体响应率 R_{bb} 和探测率 D^* 随偏置电流的变化曲线如图4所示。从测试曲线可知,当偏置电流等于临界值 $100 \mu\text{A}$ 时,探测器的响应率最大,为 10^4V/W ,此时对应的探测器的探测率 D^* 为 $2 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$,当偏置电流小于其临界值时,响应率与偏置电流呈近似直线关系;当偏置电流大于临界值时,响应率随偏置电流的增大而变小,这主要是因为随着偏置电流增大,探测器的温度升高,薄膜的电阻温度系数变小。测试中还发现在 128 元探测器中存在 2 个盲元,显微镜检查发现是由于在去除牺牲层时微桥结构破裂,信号无法读出所致。图5为 128 元红外探测器的响应率统计直方图,统计

表1 热红外探测器阵列参数

Table 1 Parameters of thermal IR detectors

结构参数	数值
阵列规模	2×64
光敏区大小	$50 \times 60 \mu\text{m}^2$
桥面厚度	$0.8 \mu\text{m}$
微腔宽度	$55 \mu\text{m}$
微腔深度	$3 \mu\text{m}$
桥腿宽度	$15 \mu\text{m}$
电极尺寸	$200 \times 500 \mu\text{m}^2$

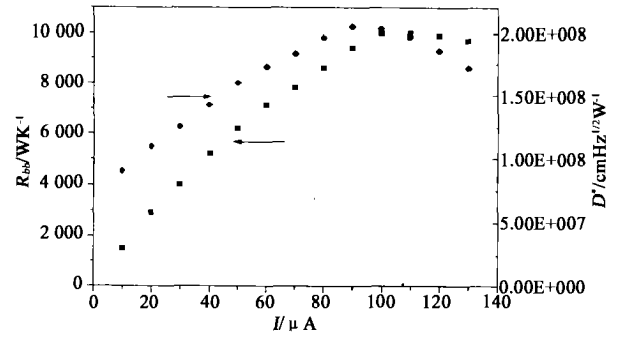


图4 探测器的黑体响应率及探测率与偏置电流关系曲线

Fig. 4 Responsivity and detectivity versus dc bias current curve of the thermal IR detectors

结果显示探测器的平均响应率为 9900WK^{-1} ,探测器响应率的非均匀性优于 15%,测试条件同上。

在制作氧化钒红外探测器时,由于没有在探测器表面涂覆黑金等红外吸收材料,所以该探测器的光谱响应主要取决于氧化钒薄膜在红外波段的吸收光谱。氧化钒红外探测器的相对光谱响应率的测试曲线如图6所示,从图中可知,探测器的响应率在所测试的 $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 波段内并非与波长无关,而是存在一定的起伏。探测器在参考波长处 $11 \mu\text{m}$ 处的相对响应率最大,在 $7 \mu\text{m}$ 处的相对响应率较小,在长波红外特别是 $9 \sim 12 \mu\text{m}$ 范围内具有较平坦的光谱响应率。测试时的辐射源为能斯特灯,偏置电流为 $100 \mu\text{A}$,参考探测器为已经标定的热释电红外探测器。

4 结语

制备具有高电阻温度系数的热敏薄膜和实现探测器光敏区与衬底之间低热导的微桥结构是实现热探测器高灵敏度探测的关键技术。本文采用一种新工艺在氮化硅衬底上制备了可以用作红外探测器热

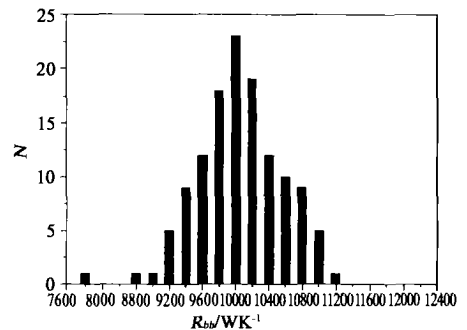


图5 128元红外探测器响应统计直方图

Fig. 5 Responsivity histogram of 128-element thermal IR detectors

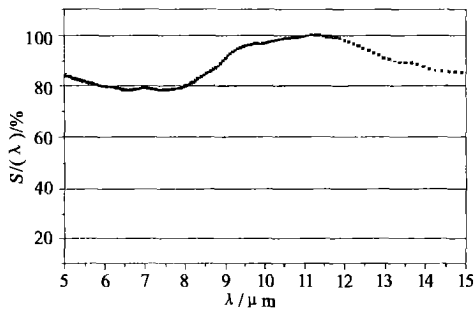


图6 红外探测器的相对红外响应光谱
Fig.6 Response spectrum of the thermal IR detectors

敏材料的氧化钒薄膜,薄膜室温时的电阻温度系数达到了 0.021K^{-1} . 文中还利用多孔硅牺牲层工艺在 Si 衬底上面制作了悬浮于微沟道之上的微桥结构,利用微桥结构可以有效减少探测器光敏区与 Si 衬底的接触面积,降低探测器与衬底之间的热导. 基于以上二项技术,本文设计制作了 128 元红外探测器,探测器的黑体响应率和探测率在调制频率为 30Hz,偏置电流为 $100\mu\text{A}$ 时达到 10^4V/W 和 $2 \times 10^8\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,非均匀性优于 15%,可以实现长波红外探测.

REFERENCES

- [1] Baltes H, Paul O, Brand O. Micromachined thermally based CMOS microsensors[J]. *Proc IEEE*, 1998, **86**(8): 1660—1678
- [2] Horn S, Lohrmann D, Campbell J, et al. Uncooled IR technology and application[J]. *SPIE*, 2001, **4639**: 210—221
- [3] Kinch M A. Fundamental physics of infrared detector materials[J]. *J Electron Mater*, 2000, **29**: 809—817
- [4] Brady J, Schimert T, Gooch D, et al. Advances in amorphous silicon uncooled IR systems[J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 1999, **3698**: 191—197
- [5] Almasri M, Butler D P, Celik B Z. Free standing amorphous Y-Ba-Cu-O detectors for uncooled IR detection and the effects of doping[J]. *Proc SPIE int Soc Opt Eng*, 1999, **3794**: 66—75
- [6] CHEN Chang-Hong, YI XIN-Jian, ZHAO Xing-Yong, et al. Preparation and properties of vanadium dioxide thin film for uncooled microbolometer[C]. Beijing: 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, 2000: 211—212
- [7] CHEN Chang-Hong, YI Xin-Jian, ZHANG Jing, et al. Micromachined uncooled IR bolometer linear array using VO_2 thin films[J]. *Int J Infrared Millim Waves*, 2001, **22**(1): 53—57
- [8] CHEN Chang-Hong, YI Xin-Jian, ZHANG Jing, et al. Characterization of uncooled VO_2 -based thin films bolometer[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈长虹, 易新建, 张静, 等. 基于 VO_2 薄膜非致冷红外探测器性能研究. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(4): 136—138