

文章编号:1001-9014(2007)05-0336-04

单片式 128×1 氧化钒微测辐射热计 非致冷焦平面的研制

陈永平, 刘 强, 施永明, 唐成伟, 梁平治

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:采用氧化钒薄膜、低应力介质膜和 CMOS 读出电路技术, 研制了单片式 128×1 非致冷焦平面. 氧化钒薄膜的制备采用了一种新的方法, 焦平面的信号读出采用了 CTIA 积分方式. 应用一种双频 PECVD 技术制备了低应力氮化硅薄膜, 有效改善了微桥的平整度. 通过氮化硅和氧化钒薄膜自身的红外吸收, 焦平面在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的平均响应率达到 $8.2 \times 10^4 \text{ V/W}$, 平均 D^* 达到 $2.3 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{w}$. 焦平面的均匀性需要进一步改善.

关键词:非致冷焦平面; 氧化钒; 低应力氮化硅; 微桥

中图分类号: TN215; O484 **文献标识码:** A

DEVELOPMENT OF MONOLITHIC 128×1 UN-COOLED VANADIUM OXIDE MICRO-BOLOMETER FOCAL PLAN ARRAY

CHEN Yong-Ping, LIU Qiang, SHI Yong-Ming, TANG Cheng-Wei, LIANG Ping-Zhi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: A monolithic 128×1 un-cooled micro-bolometer focal plan array was developed based on vanadium oxide film, low stress dielectric films and CMOS readout techniques. A new method was applied for the preparation of the vanadium oxide film. Signals of the array were read out by CTIA integration. The utilization of dual frequency PECVD techniques for deposition of low stress silicon nitride films effectively improves the flatness of micro-bridges. Depending on the infrared absorption of silicon nitride and vanadium oxide films, the average responsivity and detectivity of the array in $8 \sim 14 \mu\text{m}$ approaches $8.2 \times 10^4 \text{ V/W}$ and $2.3 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{w}$ respectively. The uniformity of the array should be further improved.

Key words: un-cooled FPA; vanadium oxide; low stress SiNx; micro-bridges

引言

非致冷焦平面 (Un-cooled Micro-bolometer PFAs) 是一种不需要低温制冷工作的焦平面器件, 利用材料的热敏特性进行红外探测. 由于不需要复杂昂贵的低温制冷系统, 非致冷焦平面在降低成本和推广应用方面具有很大的发展潜力, 成为焦平面技术发展的一个重要方向. 与热释电型^[1]、微悬臂梁型^[2]等非致冷焦平面不同, 微测辐射热计焦平面是一种热敏电阻型焦平面, 采用多晶硅或氧化钒等高电阻温度系数的半导体材料, 利用敏感元电阻随温度的变化实现红外探测. 由于这种焦平面与

CMOS 工艺有较好的兼容性, 因此近几年在国际上得到了极大的重视和发展. 自 1993 年霍尼韦尔公司首先研制出这种非致冷焦平面以来, 一些主要发达国家都先后开发出这种非致冷焦平面技术, 并在民用和军用领域获得重要应用.

最近几年, 微测辐射热计焦平面技术在国外逐渐走向成熟, 但由于其重要的应用前景, 各国仍在继续开展相关研究, 关键技术仍然没有公开. 国内在非致冷焦平面研究方面起步较晚, 虽然在单项技术上有一定突破, 但在焦平面集成方面没有显著进展. 我们在突破氧化钒和低应力介质膜制备的基础上, 采用表面微机械加工的方法实现了焦平面列阵与

收稿日期: 2006-12-29, 修回日期: 2007-06-28

基金项目: 中科院预研项目 (42201030104)

作者简介: 陈永平 (1963-), 男, 河南安阳人, 中科院上海技术物理所在职博士, 主要从事硅光电探测器和非致冷焦平面技术研究.

Received date: 2006-12-29, revised date: 2007-06-28

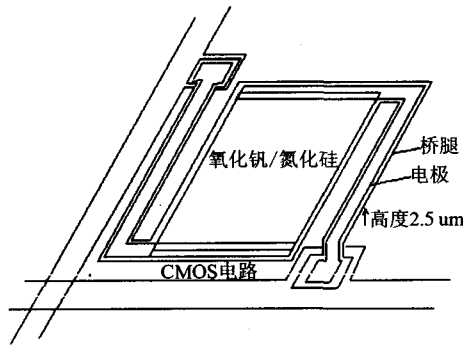


图1 焦平面阵列单元结构示意图
Fig.1 Pixel structure of the focal plan array

CMOS 电路的单片集成, 研制了 128 × 1 焦平面器件。

1 焦平面设计

焦平面的敏感元设计采用了典型的微桥式结构^[3], 如图 1, 阵列规模为 128 × 1. 为了使器件工艺能够拓展, 为面阵焦平面研制打下基础, 敏感元直接做在了读出电路上面, 形成顶层构架的微桥阵列. 敏感元的设计原则是尽可能减小热导, 提高红外吸收率, 同时电阻设计与读出电路匹配. 128 × 1 焦平面的敏感元大小为 70 × 70 μm, 中心距 80 μm, 微桥高度约 2.5 μm. 热导大小与桥腿宽度密切相关. 然而由于工艺条件的限制, 桥腿宽度设计为 8 μm, 比国外同类器件大了 1 倍以上, 因而热导也相对较大, 约为 1 × 10⁻⁶ W/°C. 敏感元微桥由多层氮化硅(厚度 550 nm)和一层氧化钒热敏薄膜(厚度 200 nm)组成, 电阻约 50 kΩ, 通过钛电极与 CMOS 电路连接. 由于氮化硅具有良好的红外吸收能力, 因此焦平面没有设计专门的红外吸收层, 拟通过氮化硅薄膜自身的红外吸收实现红外探测.

焦平面的信号读出采用了负载电阻分流与电容跨导反馈放大器^[4](CTIA)积分相结合的读出方法. 敏感元电阻 R_s 与负载电阻 R_L 组成偏置回路, 使得大多数偏置电流能够通过负载电阻分流, 而信号电流进入积分放大器积分, 见图 2. 敏感元的选择通过移位寄存器和 MOS 开关电路完成.

信号积分电流 i_{IR} 的大小决定于敏感元红外温升 ΔT :

$$i_{IR} = \alpha I_b \Delta T \quad (1)$$

其中 I_b 为偏置电流, α 为敏感元的电阻温度系数. ΔT 可由热平衡方程给出, 器件的红外响应率则可以表示为:

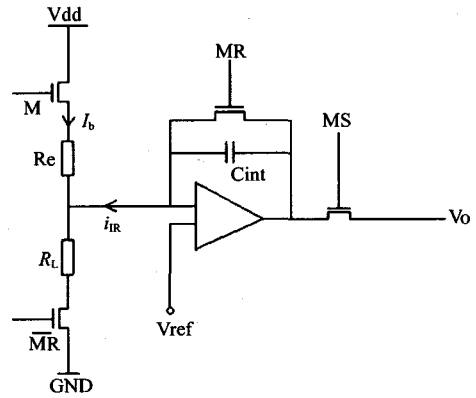


图2 焦平面 CTIA 积分读出原理图
Fig.2 Principle of CTIA integration for the focal plan array

$$R_{IR} = \frac{\eta \alpha}{G[1 + \omega^2 \tau^2]^{1/2}} \int_0^{T_i} i_{IR} dt / C_{int} \quad (2)$$

其中 G 为热导, η 为红外吸收系数, C_{int} 为积分电容, T_i 为积分时间, τ 为时间常数(决定于热容和热导之比). 由于采用了较厚的膜层和较宽的桥腿设计, 128 × 1 焦平面的时间常数在 10 ms 左右.

焦平面探测率 D^* 决定于响应率和噪声水平. 由于敏感元处于脉冲工作状态, 低频噪声的贡献很小, 器件的噪声主要是电阻噪声、温度涨落噪声和读出电路的开关噪声等. 由于敏感元电阻只有 50 kΩ 左右, 电阻噪声并不大, 在 1 MHz 带宽下仅为几十微伏量级. 因此, D^* 将主要决定于温度涨落噪声和读出电路噪声. 为简化设计, 128 × 1 焦平面只设置了一个 CTIA 放大器, 即各敏感元的信号由 MOS 开关选择后进入一个共用的负载电阻和 CTIA 放大器进行积分读出. 读出电路的加工在标准 CMOS 工艺线上完成, 焦平面阵列的加工则在 CMOS 电路基片上直接进行, 在上海技术物理所的硅工艺线上完成.

2 焦平面制作工艺

(1) 氧化钒热敏薄膜的制备

氧化钒 (VO_2) 薄膜的制备是焦平面工艺的核心之一. 国外通常采用反应溅射的方法制备氧化钒薄膜, 这种方法对设备的要求相对较高. 我们在器件工艺中则采用了另一种氧化钒制备方法^[5]. 这种方法是, 利用常规设备在常温下溅射高价氧化钒薄膜, 再通过退火得到二氧化钒热敏薄膜. 退火的工艺温度控制在 450 °C 左右, 低于 CMOS 电路能够承受的最高温度. 分析结果表明, 采用这种方法制备的氧化钒, 其成分和电阻温度特性与反应溅射法得到的氧化钒基本相同. 室温附近, 薄膜的电阻温度系数在 -

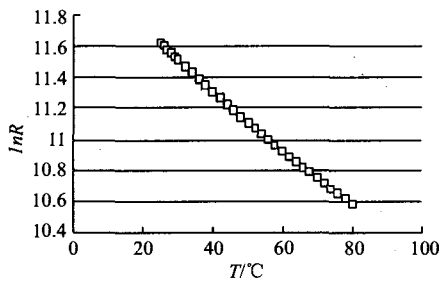


图3 氧化钒薄膜电阻随温度的变化

Fig.3 Sheet resistance of vanadium oxide versus temperature

2.4%左右,略低于反应溅射法制备的氧化钒.图3为氧化钒薄膜电阻随温度的变化曲线.由于是常温溅射,器件工艺中氧化钒的成形采用了剥离工艺.

(2) 牺牲层和介质膜工艺

为了使器件工艺能够向面阵研制拓展,128×1线阵的加工采用了表面微机械加工方法,敏感元直接做在了读出电路上面,形成顶层构架的微桥列阵.其工艺过程是,首先在电路基片上制备牺牲层,然后淀积介质膜、氧化钒薄膜和电极薄膜.各层薄膜经过光刻腐蚀后成形,最后把牺牲层“灰化”得到焦平面微桥列阵.

牺牲层的选择和刻蚀方法对焦平面成品率有一定影响.我们采用聚酰亚胺为牺牲层,通过干法刻蚀获得了较好的加工效果.微桥应力控制是焦平面研制的另一个关键,应力太大将导致敏感元微桥翘曲甚至断裂.微桥平整度控制的关键是介质膜应力的控制.为降低介质膜应力,国外采用了多种不同工艺淀积复合膜,使多层膜应力相互平衡,获得了较好效果^[6].我们则采用了一种双频 PECVD 技术,在单台设备上制备低应力氮化硅薄膜(SiN_x),获得了同样好的效果.使用的设备为 Oxford 公司的 80-Plus 双射频源 PECVD 淀积系统,工艺温度为 350°C.该设备除具备一个 13.56MHz 的高频射频源外,还有一个 400KHz 的低频射频源,通过高、低频交替淀积得到低应力氮化硅薄膜.采用这种工艺方法,微桥平整度得到有效控制,器件工艺也进一步得到简化.图4为焦平面微桥的 SEM 照片.

3 性能测试与分析

采用上述的焦平面设计和工艺,成功研制出了单片式 128×1 焦平面样品,见图 5.对膜层的红外吸收率以及焦平面响应率、 D^* 等进行了测试.

(1) 膜层的红外吸收率

由于没有设计专门的红外吸收层,器件的响应

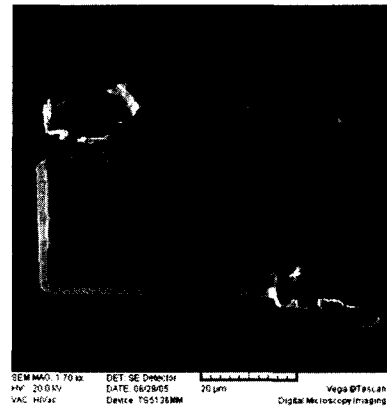


图4 焦平面微桥的 SEM 照片

Fig.4 SEM photo of the micro-bridge

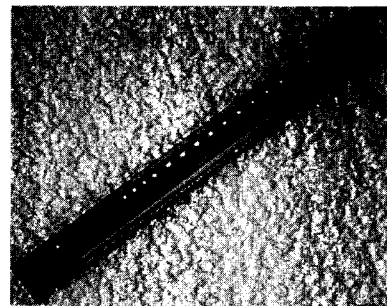


图5 128×1 焦平面芯片照片

Fig.5 Photo of the 128×1 PFA chip

将决定于膜层自身的红外吸收能力.因此,对器件工艺中的主要材料,包括氮化硅薄膜以及氮化硅与氧化钒组成的混合层进行了红外吸收率测试,测试样品的膜层厚度与器件完全相同.分别采用红外反射光谱法和黑体辐射率测量等两种方法进行了测量,测试结果基本一致.图6是测量得到的氮化硅样品以及氮化硅与氧化钒组成的混合层的黑体辐射率(吸收率).结果表明,高低频交替淀积的低应力氮化硅在 8~14μm 波段有一个较强的吸收带,吸收峰在 12μm 附近.这一结果与报道的高频 PECVD 氮化硅薄膜以及 LPCVD 氮化硅薄膜的吸收特性都非常相似^[7,8].值得注意的是,氮化硅与氧化钒组成的混合层的吸收率明显高于氮化硅,吸收波段也比氮化硅宽,表明氧化钒在红外波段也有较强的吸收能力,其机制还有待进一步研究.该结果表明,128×1 焦平面的红外响应将主要在 8~14μm 波段,但平均吸收率仅有 40% 左右.

(2) 焦平面的响应率和 D^*

器件封装于真空杜瓦中,在 BIRD210 红外焦平面性能测试系统上对 128×1 焦平面的响应率和 D^*

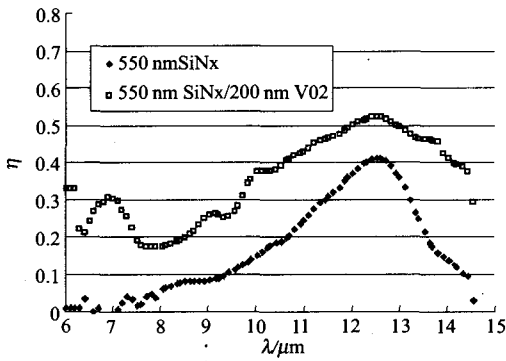


图 6 氮化硅薄膜(上)和氮化硅/氧化钒复合膜(下)的红外吸收

Fig.6 Infrared absorption of silicon nitride film (down curve) and composite silicon nitride/vanadium oxide film (up curve)

进行了测试. 信号源为 40℃ 的面黑体, 环境温度恒定在 20℃, 黑体信号不调制. 通过有辐照和无辐照情况下两次采样, 得到红外信号大小. 器件的噪声则通过多次采样得到. 测试时, 辐射信号由滤光片限制在 8 ~ 14 μm.

测试结果表明, 通过氮化硅和氧化钒薄膜的红外吸收, 焦平面实现了红外响应输出, 响应率和 D^* 都达到了一定值, 但不均匀性严重. 图 7 和图 8 为 167KHz 采样速率下的焦平面各像元的响应率和 D^* 分布. 焦平面的平均响应率为 $8.2 \times 10^4 \text{ V/W}$, 平均 D^* 为 $2.3 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{w}$, 但不均匀性达到 $\pm 25\%$.

由于没有对红外信号调制, 因此测量得到的是与时间常数无关的静态信号响应率和 D^* . 与国外同类器件相比, 器件的响应率和 D^* 偏低, 主要原因是焦平面的热导大, 红外吸收率低, 噪声水平又较高. 由于工艺条件的限制, 敏感元的桥腿宽度比国外同类器件大了一倍以上, 而吸收率低了一倍左右, 因此, 器件性能偏低也是合理的. 128 × 1 焦平面的研制证实了焦平面设计 and 主要工艺的可行性. 在此基础上, 进一步减小器件热导, 提高红外吸收率, 同时抑制焦平面噪声, 可以研制出性能更高的焦平面器件.

焦平面的不均匀性主要是敏感元电阻不均匀引起的. 由于 128 × 1 焦平面各像元的信号读出共用了一个负载电阻和积分放大器, 因此红外响应的不一致性反映了各像元电阻和信号积分电流的差别. 另一方面, 焦平面电阻的不均匀还将导致各敏感元不能同时处于最佳偏置状态, 器件的动态范围会变小. 因此, 进一步提高焦平面的均匀性应重点改善氧化钒薄膜电阻的均匀性.

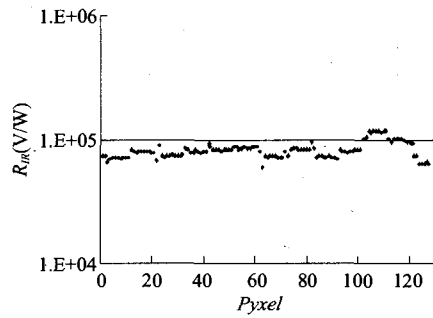


图 7 128 × 1 焦平面的响应率
Fig.7 Responsivity of the 128 × 1 array

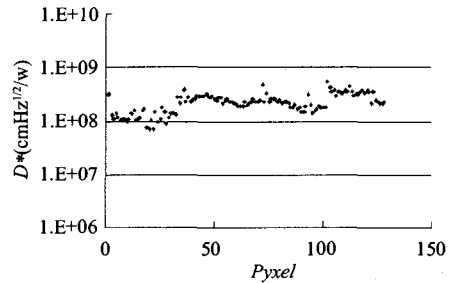


图 8 128 × 1 焦平面的 D^*
Fig.8 Detectivity of 128 × 1 array

4 结语

128 × 1 焦平面的研制应用了一种新的氧化钒热敏薄膜技术和低应力介质膜技术, 并成功实现了探测器阵列与 CMOS 读出电路的单片集成. 由于采用了顶层结构, 焦平面工艺具有可拓展性. 通过氮化硅和氧化钒薄膜自身的红外吸收, 焦平面可以响应 8 ~ 14 μm 波段的红外辐射, 平均 D^* 达到了 $2.3 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{w}$, 但不均匀性有待改善. 在此基础上, 进一步改进设计和优化工艺, 可以研制出更高性能的焦平面器件.

REFERENCES

- [1] HU Xu, TAI Yun-Jian, YUAN Jun, *et al.* Latest development of hybrid uncooled pyroelectrical IR FPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡旭, 太云见, 袁俊, 等. 非制冷铁电混合式红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*) 2006, **25**(1): 17—21.
- [2] LIU Hai-Tao, CHEN Yong-Ping, LIANG Ping-Zhi. Design and fabrication of micro-cantilever uncooled infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘海涛, 陈永平, 梁平治. 微悬臂梁非致冷红外探测器的研制. *红外与毫米波学报*). 2006, **25**(1): 46—49.
- [3] Wood R A. Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal plan[J]. *SPIE*, 1993, 2020 : 322—329
- [4] Mottin E. Amorphous Silicon Technology Improvement at CEA/LETI[J]. *SPIE*, 2002, 4650 : 138—149.

(下转 348 页)

- 王健,等. 应用于 40Gb/s 电吸收调制器的 Al_2O_3 高速热沉研究. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(2):105—108.
- [3] Qu Xi-Xin. *Handbook of Materials for Electronic Components* [M]. Beijing: Electronic Industry (曲喜新. 电子元件材料手册. 北京: 电子工业出版社), 1989, 559—563.
- [4] Obata M, Sakuda T, Hayashibe R, *et al.* Characterization of contact resistance between electrode and TaN_x thin-film resistor prepared by reactive sputtering[J]. *Electronics and Communications in Japan Part II-Electronics*, 2004, **87**(9): 30—37.
- [5] Obata M, Sakuda T, Abe K, *et al.* Contact property between metal and tantalum nitride film characterized by using transmission line model[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2004, **180**:136—139.
- [6] Kim Deok-kee, Lee Heon, Kim Donghwan, *et al.* Electrical and mechanical properties of tantalum nitride thin films deposited by reactive sputtering [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **283**(3-4): 404—408.
- [7] Stampfl C, Freeman A J. Stable and metastable structures of the multiphase tantalum nitride system[J]. *Physical Review B*, 2005, **71**(2): No. 024111.
- [8] Wu Ding-fen, Yan Ben-da. *Principle, Test and Processing of Ohmic Contact Between Metal-semiconductor Interface* [M]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University Press, (吴鼎芬, 颜本达. 金属-半导体界面欧姆接触的原理、测试与工艺. 上海: 上海交通大学出版社), 1989, 22—45.
-
- (上接 339 页)
- [5] ChaoYong-Feng, Ru Guo-Ping, Chen Yong-Ping, *et al.* Temperature dependence of the vanadium oxide films for micro-bolometer detectors[J]. *Semiconductor Technology* (曹永峰, 茹国平, 陈永平, 等. 用于微测辐射热计的氧化钒热敏薄膜材料的温度特性. 半导体技术), 2003, **27**(5):58—62.
- [6] Hideo Wada, Mitsuhiro Nagashima. Fabrication process for 256×256 bolometer-type uncooled infrared detector[J]. *SPIE*, 1997, **3224**:40—51.
- [7] Yang Zhao, Mingyao Mao. Opto-mechanical un-cooled infrared imaging system design, micro-fabrication and performance. [J], *J. Microelectromechanical Systems*, 2002, **11**(2):136—146.
- [8] Ay F, Andinli A. Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguide. [J], *Optical Materials*, 2004, **26**:33—46.