

文章编号: 0253-2239(2010)10-2817-04

# CMOS 兼容自对准微机械热电堆红外探测器

徐德辉<sup>1,2</sup> 熊 斌<sup>1</sup> 王跃林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室,微系统技术国家重点实验室,上海 200050

<sup>2</sup>中国科学院研究生院,北京 100049

**摘要** 微机械热电堆红外探测器由于无需致冷,后续检测电路简单,成本低等优点在许多领域得到了广泛应用。提出了一种采用互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容技术及自对准工艺制作的微机械热电堆红外探测器,以减小微机械热电堆红外探测器的工艺复杂度,减小微小释放孔结构的制作难度。和传统的微机械热电堆红外探测器相比,自对准微机械热电堆红外探测器的释放孔大小是由多晶硅热电偶臂之间的间距确定,而不是由光刻工艺确定。为研究自对准微机械热电堆红外探测器性能和热电堆结构之间的关系,设计并制作了两种不同结构的自对准微机械热电堆红外探测器。测试结果表明方形热电堆结构可以获得大的输出电压及响应率,圆形热电堆结构则可以获得快的响应和大的探测率。

**关键词** 探测器;微机械热电堆;红外探测器;自对准;CMOS兼容;微机电系统

**中图分类号** TN379;TN403 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2817

## CMOS Compatible Self-Aligned Micromachined Thermopile IR Detector

Xu Dehui<sup>1,2</sup> Xiong Bin<sup>1</sup> Wang Yuelin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transducer Technology, Science and Technology on Micro-system Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Due to its advantages of uncooling, ease of operation and low cost, micromachined thermopile infrared (IR) detectors have a broad application. A novel complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) compatible self-aligned micromachined thermopile IR detector is proposed to reduce the fabrication complication and fabrication difficulty of micro etching windows. Compared with conventional micromachined thermopile IR detectors, the etching windows in the self-aligned thermopile structure are determined by space between polysilicon thermocouple legs rather than by photolithographic processing. Two types of thermopile structures are designed and fabricated in order to study the influence of device structure on IR detector performance. Experimental results show that the rectangular thermopile structure has a higher output voltage and responsivity, whereas the circular IR detector exhibits a smaller response time and a higher specific detectivity.

**Key words** detector; micromachined thermopile; IR detector; self-aligned; CMOS compatible; MEMS

## 1 引 言

红外探测技术总体上可以划分为光子红外探测和热红外探测<sup>[1,2]</sup>。和光子红外探测技术相比,热红外探测技术一般性能指标偏低,但热红外探测技术可以实现非致冷室温红外探测,从而可以减小红

外探测系统的体积、能耗和成本<sup>[3]</sup>。近年来,随着微电子机械系统(MEMS)技术的发展,低成本的红外探测器的批量制作成为可能,微机械热红外探测器也得到广泛关注和研究<sup>[3~10]</sup>。

微机械热电堆红外探测器利用塞贝克效应实现

收稿日期: 2010-06-22; 收到修改稿日期: 2010-08-03

作者简介: 徐德辉(1985—),男,博士研究生,主要从事红外 MEMS 器件方面的研究。E-mail: dehuixu@mail.sim.ac.cn

导师简介: 熊 斌(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事 MEMS 技术、CMOS-MEMS 技术与器件等方面的研究。

E-mail: bxiong@mail.sim.ac.cn

红外-热-电之间的转换,探测器产生的温差电动势是自激励信号,所以微机械热电堆红外探测器工作时无需偏置和斩波,工作环境温度对探测器的影响也较小,探测器的后续处理电路也较简单<sup>[1,8,9]</sup>。为了减小探测器的体积,微机械热电堆红外探测器研究的一个热点是采用前端硅腐蚀技术制作微机械热电堆结构<sup>[8,9]</sup>。传统前端腐蚀微机械热电堆红外探测器一般采用最后一步光刻工艺光刻出微机械热电堆结构的释放孔,然后通过刻蚀制作硅腐蚀所需的释放孔。由于释放孔是通过光刻定义,制作微小释放孔的难度很大。此外,综合考虑光刻对准误差和释放孔刻蚀时的横向腐蚀,热电偶侧壁一般都会有 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 的介电层以保护多晶硅热电偶结构在硅腐蚀释放工艺中不会被腐蚀,热电偶的热阻也就不能进一步的减小。为了解决上述问题,本文设计并制作了一种自对准结构微机械热电堆红外探测器,并对器件的性能进行了测试。

## 2 自对准探测器结构制作

为了进一步降低探测器的成本,采用互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容工艺制作自对准微机械热电堆红外探测器,CMOS工艺中的多晶硅/铝作为热电堆中的热电偶敏感单元,微机械热电堆的释放和热隔离采用二氟化氙( $\text{XeF}_2$ )气相干法腐蚀以消除湿法腐蚀中的微结构粘附问题<sup>[2,9]</sup>。 $\text{XeF}_2$ 腐蚀硅衬底释放热电堆结构后,氧化硅/氮化硅( $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ )薄膜支撑着悬浮的热电堆结构。由于CMOS介电薄膜在红外波段表现出一定的吸收能力<sup>[9,10]</sup>, $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜还直接作为热电堆探测器吸收区的红外吸收材料以减小探测器的工艺复杂度。器件的工艺流程如图1所示,详细制作工艺为:

1)在抛光的硅片上,通过低压化学气相沉积方法(LPCVD)依次沉积一层 $0.1\ \mu\text{m}\ \text{Si}_3\text{N}_4$ , $0.5\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 多晶硅(Polysilicon)。多晶硅离子注入掺杂后,通过反应离子刻蚀(RIE)刻蚀多晶硅,形成多晶硅热电偶臂,如图1(a)所示。

2)通过光刻和HF腐蚀,将多晶硅热电偶臂之间的 $\text{SiO}_2$ 去除,形成释放孔结构,如图1(b)所示。

3)采用高温氧化工艺,在多晶硅四周生长一层 $0.5\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ ,并同时激活多晶硅中的掺杂离子。 $\text{SiO}_2$ 的包裹保护多晶硅在后续硅腐蚀工艺中不被 $\text{XeF}_2$ 气体腐蚀,如图1(c)所示。

4)利用 $150\ ^\circ\text{C}$ 磷酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )将 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 去除,由于 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 高腐蚀选择比,多晶硅和 $\text{SiO}_2$ 都不会被

腐蚀,只有多晶硅热电偶臂之间的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 被腐蚀,从而将释放孔处的硅衬底露出,如图1(d)所示。

5)在多晶硅热电偶臂上刻蚀出接触孔,溅射 $1\ \mu\text{m}$ 铝,并对铝进行图形化,形成多晶硅/Al热电偶,如图1(e)所示。

6)利用 $\text{XeF}_2$ 气体从芯片前端的释放孔腐蚀硅衬底,释放悬浮热电堆结构,对热电堆结构进行热隔离,如图1(f)所示。

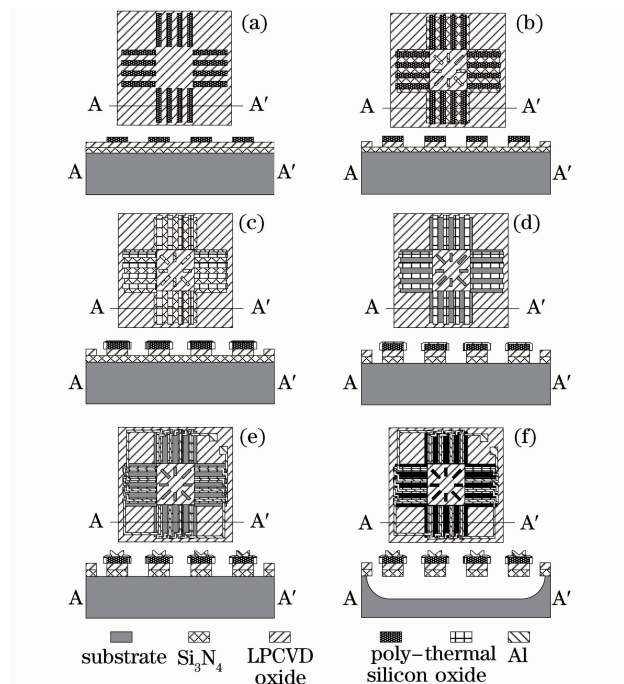


图1 自对准微机械热电堆红外探测器工艺流程

Fig.1 Fabrication flow chart of self-aligned micromachined thermopile IR detector

从器件的制作流程可以看出释放孔大小完全由多晶硅热电偶臂之间的间距确定,而不是由光刻确定,释放孔的制作实现了自对准,故制作微小释放孔的难度大大降低。并且热电偶侧壁只有一层热氧化工艺生长的 $0.5\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ ,侧壁介电薄膜对热电偶热导的影响也降到最低。

## 3 结果与讨论

为了研究探测器性能与热电堆结构的关系,分别设计并制作了方形热电堆结构和圆形热电堆结构。两种结构的吸收区面积和热电偶长度都设计为 $0.16\ \text{mm}^2$ 和 $600\ \mu\text{m}$ ,以比较两种结构的性能。方形结构有64对热电偶,圆形结构有60对热电偶,器件的SEM图片如图2所示。多晶硅热电偶臂在释放后都完整,多晶硅没有被侧向腐蚀,表明氧化生长的 $0.5\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ 在 $\text{XeF}_2$ 硅腐蚀工艺中实现了对多

晶硅的保护。此外,从图 2(b)可以明显看出圆形热电堆结构上的圆弧形横向硅衬底腐蚀痕迹,展示了 XeF<sub>2</sub> 气体对硅各向同性腐蚀特性。由于 XeF<sub>2</sub> 腐蚀的开口效应,释放孔的最小尺寸设计为 3 μm 以减小热电堆结构释放时间。

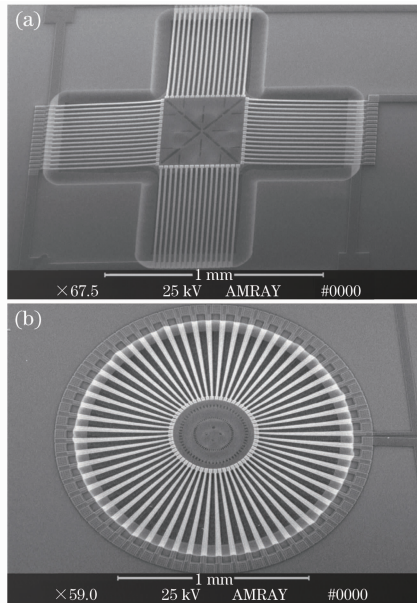


图 2 (a)方形和(b)圆形微机械热电堆红外探测器结构的 SEM 照片

Fig. 2 SEM pictures of (a) rectangular and (b) circular micromachined thermopile IR detectors

### 3.1 器件电学特性

热电堆探测器的电阻通过 I-V 测试确定,测试结果如图 3 所示,测试结果表明方形热电堆和圆形热电堆的电阻值分别为 290 kΩ 和 132 kΩ。对于热电堆红外探测器,热噪声是其主要噪声来源,热噪声的表达式为<sup>[1]</sup>

$$V_n = \sqrt{4kTR_{\text{elec}}\Delta f}, \quad (1)$$

式中  $k$  是玻耳兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  是工作环境温度,  $R_{\text{elec}}$  是热电堆探测器的电阻值,  $\Delta f$  是工作带宽。根据(1)式可以计算出方形热电堆探测器和圆

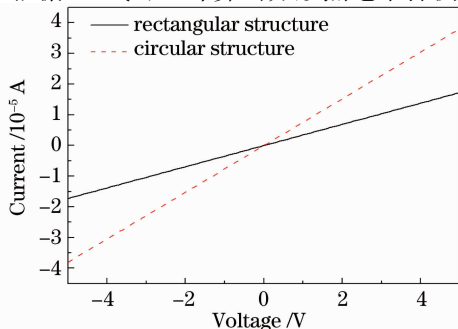


图 3 方形和圆形热电堆 I-V 曲线

Fig. 3 I-V curves of rectangular and circular thermopile

形热电堆探测器的工作噪声分别为 69.2 nV/Hz<sup>1/2</sup> 和 46.8 nV/Hz<sup>1/2</sup>。

### 3.2 器件红外特性

热电堆红外探测器的红外特性测试平台包括黑体炉用来产生红外辐射,机械斩波器对红外辐射信号进行调制,热电堆红外探测器的响应电压在放大后通过示波器进行观察和数据保存。探测器的测试都是在室温,常压大气环境下进行。

对于 4 Hz 斩波的 500 °C 黑体辐射,探测器和黑体炉间距为 15 cm 时,方形探测器和圆形探测器的放大响应波形如图 4 所示。方形探测器和圆形探测器都正常工作,并且方形探测器的响应电压要略高于圆形探测器。通过改变探测器和黑体炉的间距,可以调整探测器所接收的红外辐射信号强度,从而测试探测器的线性响应特性。测试结果如图 5 所示,两种结构的探测器都表现出良好的线性响应特性。

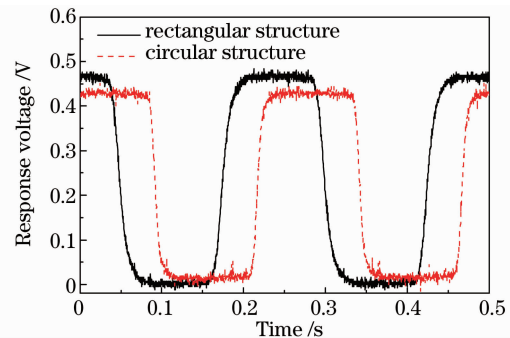


图 4 圆形和方形探测器红外响应

Fig. 4 IR response of rectangular and circular detectors

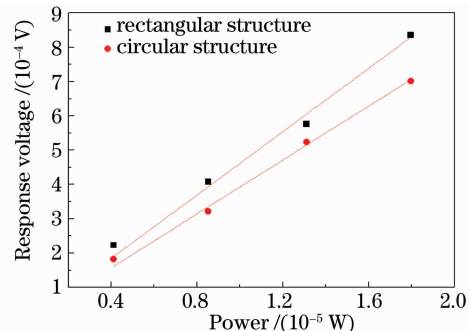


图 5 方形和圆形结构的线性响应

Fig. 5 Linear response of rectangular and circular structures

热电堆红外探测器的响应率( $R_s$ )可通过计算单位红外辐射功率所产生的电压信号输出获得,即<sup>[1]</sup>

$$R_s = \frac{V_{\text{out}}}{\varphi_0 A_D}, \quad (2)$$

式中  $V_{\text{out}}$  为热电堆探测器的输出电压,  $\varphi_0$  为红外辐射的功率密度,  $A_D$  为热电堆吸收区的面积。红外探测器的噪声等效功率 ( $P_{\text{NE}}$ ) 表征了探测器输出电压等于探测器本身的噪声电压时所需的红外辐射功率, 其表达式为

$$P_{\text{NE}} = V_n/R_s, \quad (3)$$

探测器的探测率可用来比较不同探测器的性能, 其计算公式为<sup>[1]</sup>

$$D^* = \frac{R_s \sqrt{A_D}}{\sqrt{4kTR_{\text{elec}} \Delta f}}. \quad (4)$$

表 1 给出了根据(2)~(4)式计算确定的自对准微机械热电堆红外探测器性能指标。其中, 响应时间是通过测量 4 Hz 斩波频率时探测器响应值上升到最大响应值的 63% 所需时间确定。

表 1 热电堆探测器的红外性能参数

Table 1 IR performance parameters of thermopile detector

Device structure	$R_s /$ (V/W)	$P_{\text{NE}} /$ (nW/Hz <sup>1/2</sup> )	$D^* /$ [(cm·Hz <sup>1/2</sup> )/W]	$\tau /$ ms
rectangular	43.5	1.59	$2.51 \times 10^7$	14.1
circular	38.1	1.23	$3.25 \times 10^7$	12.6

和圆形热电堆红外探测器相比, 方形热电堆红外探测器具有更高的响应率、噪声等效功率和响应时间, 更低的探测率。由于圆形热电堆结构中的扇形热电偶结构, 圆形热电堆结构具有更低的电阻和热阻, 所以圆形探测器表现出小的响应率, 噪声等效功率和响应时间。从(4)式可见, 探测率是由噪声和响应率两者同时确定, 虽然方形结构的响应率较大, 但其噪声也大, 并且方形结构热电堆响应率的增加并没有超过其噪声电压的增加, 所以方形结构比圆形结构表现出更小的探测率。

尽管探测器的吸收区直接采用  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  作为红外吸收材料, 而没增加其他红外吸收材料, 自对准红外探测器还是表现出了和商用微机械热电堆红外探测器 TPS 334 相接近的性能, TPS 334 的响应率为 35 V/W, 等效噪声功率为 1.2 nW/Hz<sup>1/2</sup>, 探测率为  $6 \times 10^7$  (cm·Hz<sup>1/2</sup>)/W, 时间常数为 25 ms。

## 4 结 论

采用 CMOS 兼容工艺和  $\text{XeF}_2$  腐蚀工艺, 设计并制作了两种自对准微机械热电堆红外探测器。在

自对准制作工艺中, 探测器的释放孔大小不是由光刻确定, 而是由多晶硅热电偶之间的间距决定, 从而能够减小制作微小释放孔的难度。自对准微机械热电堆红外探测器的测试结果表明圆形热电堆结构具有更小的响应时间和更高的探测率, 而方形结构则具有更高的响应率和噪声等效功率。提出的自对准制作工艺不仅可用于微机械热电堆红外探测器, 也可以用于其它微机械电子系统器件, 如热对流器件和热能源收集器等。

## 参 考 文 献

- 1 A. Graf, M. Arndt, M. Sauer *et al.*. Review of micromachined thermopiles for infrared detection [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(7): R59~R75
- 2 Yang Hengzhao. CMOS Compatible Thermopile Infrared Detector Released by Dry Etching [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, 2008. 11~13  
杨恒昭. CMOS 兼容的干法刻蚀释放热电堆红外探测器[D]. 上海: 中科院上海微系统与信息技术研究所, 2008. 11~13
- 3 H. Baltes, O. Paul, O. Brand. Micromachined thermally based CMOS microsensors[J]. *Proc. IEEE*, 1998, **86**(8): 1660~1678
- 4 Ma Xiaoyu, Fang Zhihua, Rao Changhui *et al.*. Design and simulation: application of Hartmann-Shack Sensor in optical readout system of uncooled infrared imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 490~495  
马晓燠, 樊志华, 饶长辉等. 基于哈特曼波前传感器的非致冷红外成像光学读出系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 490~495
- 5 Xiong Zonglong, Yang Kuntao, Zhang Nanynagsheng. Detecting model of infrared radiation of human body indoors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3379~3384  
熊宗龙, 杨坤涛, 张南洋生. 室内人体表面红外辐射探测模型[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3379~3384
- 6 Feng Fei, Jiao Jiwei, Xiong Bin *et al.*. Study of all-light thermal imaging chip and system based on MEMS technology [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, **25**(4): 477~480  
冯飞, 焦继伟, 熊斌等. 基于 MEMS 技术的全光热成像芯片与系统的研制[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(4): 477~480
- 7 Xu Zhengyi, Xiong Bin, Wang Yi *et al.*. Micromachined infrared thermopile detector [J]. *J. Mechanical Strength*, 2001, **23**(4): 539~542  
徐峥谊, 熊斌, 王翊等. 微机械红外热堆探测器[J]. *机械强度*, 2001, **23**(4): 539~542
- 8 R. Lenggenhager, H. Baltes, J. Peer *et al.*. Thermoelectric infrared-sensors by CMOS technology [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 1992, **13**(9): 454~456
- 9 Dehui Xu, Bin Xiong, Yueling Wang *et al.*. Integrated micromachined thermopile IR detectors with an  $\text{XeF}_2$  dry-etching process [J]. *J. Micromech. Microengng.*, 2009, **19**(12): 125003
- 10 N. Schneeberger, O. Paul, H. Baltes. Optimized structured absorbers for CMOS infrared detectors [C]. Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Sweden, 1995. 648~651