

非制冷铁电混合式红外焦平面探测器

胡旭^{1,2}, 太云见², 袁俊², 蔡毅²

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要:介绍了国内非制冷铁电混合式红外焦平面探测器的最新研究进展, 给出器件所采用的铁电材料的基本物理和电学特性参数、器件的热隔离技术和相应参数、读出电路的基本结构和性能, 详细讨论了影响性能的关键参数和工艺, 最后对试验结果进行了分析。

关键词:红外; 焦平面探测器; 非制冷; 铁电

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

LATEST DEVELOPMENT OF HYBRID UNCOOLED PYROELECTRIC IR FPA

HU Xu^{1,2}, TAI Yun-Jian², YUAN Jun², CAI Yi²

(1. Communication Engineering College of Chongqing University, Chongqing 40044, China;

2. Kunming Institute of Physics; Kunming 650223, China)

Abstract: Progress in Hybrid Uncooled Pyroelectric IR FPA was introduced. Not only the electric and physical characteristics of the materials that are used in the FPA, but also its heat isolation structure and ROIC technology were discussed in detail. The key factor of the FPA's performance was analyzed. At last, the experimental result and some methods were discussed and analyzed.

Key words: IR; FPA; uncooled; pyroelectric

引言

铁电型非制冷探测器有代表性的主要是以下两家公司产品: 1、德州仪器公司研制的铁电型焦平面探测器^[1]已商业化, 其规模为 320×240 元, 像元尺寸 $48.5 \mu\text{m} \times 48.5 \mu\text{m}$, 噪声等效温差 (NETD) 小于 70mK 。2、英国宇航系统公司红外有限责任公司采用钽钛酸铅 (PST) 研制的铁电型非制冷焦平面探测器, 像元数达到 256×128 ; 像元中心距: $56 \mu\text{m}$; NETD $< 120 \text{mK}$ 。

2005年9月, 昆明物理研究所采用锆钛酸铅 (PZT) 体材料, 研制成功 160×120 元、探测元中心尺寸 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的非制冷焦平面探测器。本文将从探测器原理、器件材料、器件结构、器件热隔离结构和加工技术、读出电路等几个方面对该器件进行详细介绍。

1 铁电红外探测器原理

铁电非制冷焦平面探测器是一种在室温工作、利用热释电效应将红外辐射转变成电信号、实现凝视热成像的红外探测器。探测器的工作原理是: 入射的红外辐射使晶体的响应元的温度升高, 而温度的变化使偶极矩改变, 从而产生一个可以观察到的外电场。敏感元的温度变化量 ΔT_d 和热容 ξ 及热导 δ 的数学表达式为:

$$\xi \frac{dT_d}{dt} - \delta \Delta T_d = \Phi \quad (1)$$

式中: Φ ——入射红外辐射;

ξ ——热容;

δ ——热导;

ΔT_d ——敏感元的温度变化量。

对于面积为 A 的探测器, 周期变化的红外辐射功率 Φ 相应的温度变化量 ΔT_d 可以表示为:

收稿日期: 2005-07-24, 修回日期: 2005-10-30

基金项目: 兵器基金(404050503-2), 云南省创新基金(2003PX14)

作者简介: 胡旭(1971-), 男, 云南昆明人, 昆明物理研究所焦平面研发中心副主任, 在职博士, 主要从事焦平面探测器及信号处理电路研究。

Received date: 2005-07-24, revised date: 2005-10-30

$$\varepsilon\Phi\delta^{-1}\left[1+\varepsilon\omega^2\left(\frac{\xi}{\delta}\right)^2\right]^{-1/2}=\Delta T_d, \quad (2)$$

其中 ε 为发射率, ω 为入射红外辐射的角频率。

对于周期变化的红外辐射, 假设在整个探测器上被均匀吸收, 那样探测器的电压响应率可以表达为:

$$V_s = \frac{\Phi AR}{(1+\omega^2 R^2 C_c^2)^{1/2}} \cdot \frac{d(\Delta T_d)}{dt}, \quad (3)$$

从式(3)中可以看出, 其他条件不变的情况下, 热导越小, 热释电信号电压 V_s 越高, NETD 值也就越小. 这样就要求在工艺可以实现的前提下, 钨柱的直径尽量小。

混合式热释电非制冷焦平面探测器的成像质量决定于噪声等效温差和空间分辨率, 制约噪声等效温差的主要因素是热传导. 从上面两式中可以看出当 A_d 固定时, 提高响应率就必须在焦平面器件的单元结构上下功夫, 尽量提高器件热容、降低器件热导并且积极寻找新的热电系数较高的铁电材料。

2 混合式铁电焦平面器件结构

混合式铁电焦平面器件由铁电敏感元和 CMOS 读出电路芯片倒装焊构成. 铁电材料的作用是将红外辐射转变成电信号; 读出电路将每个探测元的信号读出, 变空间分布的电信号为时序信号, 以便于实现凝视热成像. 该器件的研制主要涉及铁电材料的物理特性和制备技术、绝热结构制作技术、读出电路 3 个方面, 器件结构如图(1)所示。

3 铁电材料

探测器采用热释电系数高、电阻率大、介电常数小和正切损耗低的探测器材料. 在我们研制的 160×120 混合式非制冷焦平面探测器中使用的改性 PZT(锆钛酸铅)材料参数^[2]为: 材料尺寸: $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$; 相对介电常数 ε_r : ~ 280 ; 正切损耗 $\text{tg}\delta$: $< 1.3\%$; 电阻率: $> 5 \times 10^{12} \Omega \text{ cm}$; 热释电系数: $8 \times 10^{-8} \text{ C}/^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$; 极化方向为 Z 向. 材料经过工艺减薄后, 通过表面处理尽量降低表面损伤使正切损

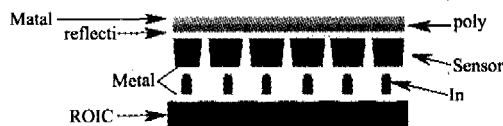


图1 混成阵列探测器结构

Fig.1 Structure of hybrid uncooled detector

耗较小, 用在探测器上的已极化的 PZT 铁电材料在工作时不需另要外加极化电场。

4 热隔离结构

在铁电红外焦平面探测器中热串音的影响较大, 热串音的引入降低了焦平面探测器的空间分辨率. 通常情况下在读出电路和热释电材料之间采用钨柱连接但钨的热导较大, 因为 $\rho_{in} = 0.816 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 同时氮气和 PZT 的热传导系数比较小, 它们的热导与钨柱的热导相比是相当小的, 可以忽略不记. 在满足热时间常数要求的前提下, 减小钨柱热导是提高器件性能的重要途径. 目前钨柱参数见表 1:

上述数据是在像素响应时间为 $\tau_r = 33 \text{ ms}$ 的情况下测算的, 其中 H 为钨柱高度, R 为钨柱半径。

制约空间分辨率的横向热扩散, 可以采取技术措施引入网格化热隔离技术, 降低像元的横向热扩散, 从而有效地提高探测器的空间分辨率. 目前, 国外普遍采用激光化学辅助刻蚀和离子束刻蚀两种技术方案。

本文介绍的器件采用双面离子束刻蚀技术进行减薄、刻蚀成形. 将铁电材料减薄后进行光刻、离子束刻蚀, 后从材料的另一面进行减薄, 效果如图(2)所示。

5 读出电路

铁电红外焦平面阵列的工作性能除了与读出电路的电荷处理能力, 动态范围、串扰、噪声抑制等密切相关^[3]。

表1 钨柱物理参数

Table 1 Indium bond-beam parameter

像元规模	H(μm)	R(μm)	C($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)	G(W/K)
128 × 128	14	30	5.0×10^{-7}	4.19×10^{-4}
160 × 120	35	10	5.0×10^{-7}	2.6×10^{-6}

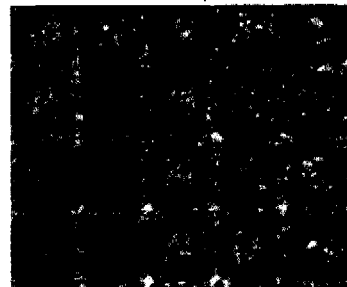


图2 刻蚀效果图

Fig.2 Result of ion beam etching

铁电型探测器件本身是容性元件,阻抗极高,电荷信号较小,比较适合使用高阻抗 CMOS 电路^[4,5], CMOS 电路的主要噪声是由读出电路像元内 MOS 管阈值电压不均匀性合开关复位引起的噪声,且面阵越大,视频输出总线电容愈大,这种噪声影响更为严重,采用合适的电路设计将能有效地降低这一噪声.采用的读出电路如图(3).

6 结论

本文介绍的铁电混合式焦平面器件在 2005 年研制成功,采用锆钛酸铅(PZT)体材料、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 探测元尺寸的非制冷焦平面探测器.利用该器件得到的红外图像见图(4).

从图(4)可以明显看到,但目前的器件在材料平整性、倒装焊的连通率、读出电路的噪声抑制等几方面存在问题,改进的余地较大;同时器件敏感元的热隔离方面工艺技术还有较大的潜力可以挖掘.

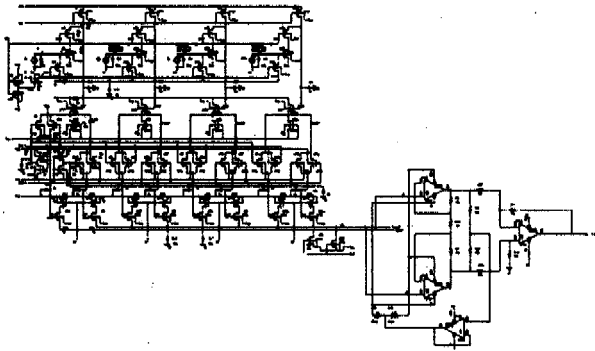


图3 ROIC 原理电路图
Fig.3 Block diagram of ROIC

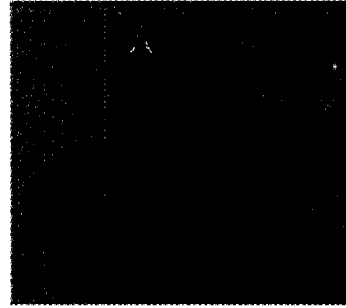


图4 原始热像
Fig.4 UFPA raw IR image

在上述问题进一步改进后,混合式非制冷焦平面器件的性能、水平还能提高,探测器有希望在近期提供工程化应用.

REFERENCES

- [1] Scott B Evans, Terrence Hayden. Raytheon system company. high MTF hybrid ferroelectric IR FPA. [J] *SPIE*, 1998, **3379**:36—46.
- [2] YAN Ping-Xiong, MENG Xiang-Jian, HUANG Zhi-Ming, et al. Ferroelectric polaron in layered perovskite ferroelectric thin films [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨平雄, 孟祥建, 黄志明, 褚君浩, 等. 层状钙钛矿铁电薄膜中铁电极化子研究, *红外与毫米波学报* 2005, **24**(1):1—6.
- [3] Ou Zheng, Li Tao. Application of CMOS image sensor in space technology [J]. *ACTA OPTICA SINICA* (尤政, 李涛. CMOS 图像传感器在空间技术中应用. *光学学报* 2002, **28**(1):31—35.
- [4] Sung Tai-Ping, Yuna-Lung Chin, Wen-Taw, et al. Nevel CMOS readout techniques for uncooled pyroelectric [J]. *SPIE*, 1998, **3360**:60—72.
- [5] Watton R, Manning P A. The design of low-noise arrays of MOSFET for proelectric array readout [J]. *SPIE*, 1987, **807**:98—105.