

非制冷铁电混合式焦平面探测器新研究*

胡 旭^{1,2} 黄承彩² 太云见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, 昆明 650223)

摘 要 本文报道一种 128×128 元铁电非制冷混合式焦平面探测器, 涉及该器件的混合式结构. 分析了影响器件性能的关键因素, 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. 对实验数据所涉及的原理进行了讨论, 最后给出了利用该器件得到的清晰红外热像.

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

0 引言

非制冷热成像技术的核心是非制冷焦平面探测器. 目前, 进入系统应用和批生产阶段的非制冷焦平面探测器有铁电型和热敏电阻型非制冷焦平面探测器(UFPA).

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已商业化, 其规模为 320×240 元, 像元尺寸 48.5 μm×48.5 μm, 工作温度 22℃, 工作波段 7~14 μm, 噪声等效温差(NETD)小于 70 mK; 2) 英国宇航系统公司红外有限责任公司采用钽铌酸铅(PST)研制的铁电型非制冷焦平面探测器和手持热像仪, 像元数达到 256×128; 像元中心距 56 μm; 探测率 $D^* \sim 7 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$; NETD < 120 mK.

我国开展铁电非制冷焦平面探测器的研制比发达国家起步晚, 但在 2004 年取得突破性进展, 昆明物理研究所采用锆钛酸铅(PZT)体材料、研制成功 128×128 元、探测元中心尺寸 100 μm×100 μm 的非制冷焦平面探测器, 其探测率达到 $D^* \sim 1 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 该器件的研制成功实现了国内红外非制冷探测器技术的零的突破. 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. 响应元的温度 ΔT_d 的变化和其热容 ξ 及热导 δ 的关系为

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

式中 Φ 为递增的入射红外辐射. 对于周期变化的红外辐射功率, 假设在整个探测器上被均匀吸收, 那样探测器的响应率可以表达为

$$\omega \rho A_d \Delta T_d(\omega) R_c (1 + \omega^2 \tau_c^2)^{-1/2} = V_s \quad (2)$$

式中 V_s 为探测器响应率, A_d 为响应晶体的敏感元面积, ρ 为热电系数, R_c 为探测器/前放电路的等效输入阻抗, ω 为入射红外辐射的角频率, $\tau_c = R_c C_c$, 其中 C_c 为等效电容.

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. 从式(1), (2)中可以看出当 A_d 固定时, 提高响应率就必须改进焦平面器件的单元结构, 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、读出电路三个方面, 器件结构如图 1.

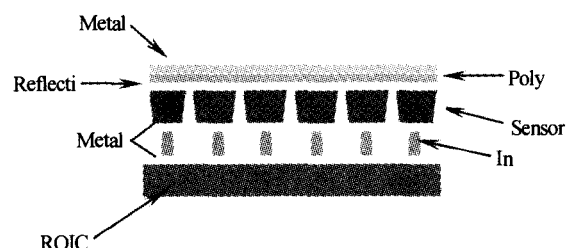


图 1 混成列阵探测器结构
Fig. 1 Structure of hybrid uncooled detector

* 兵器基金(04050503-2)和云南省创新基金(2003PY14)资助项目

Tel: 0871-5105522 Email: seeyounet@163.net

收稿日期: 2005-01-03

3 铁电材料

探测器材料性能优劣直接影响铁电探测器性能. 制作性能良好的探测器, 需要热释电系数高、电阻率大、介电常数小和正切损耗低的探测器材料. 在研制的 128×128 混合式非制冷焦平面探测器中使用的改性 PZT(锆钛酸铅) 材料参数为: 材料尺寸: $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$; 相对介电常数 $\epsilon_r \sim 280$ (测试频率 1 kHz); 正切损耗 $\tan \delta < 1.3\%$; 电阻率 $> 5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ (测试电压 50 V); 热释电系数 $8 \times 10^{-8} \text{ C}/\text{C} \cdot \text{cm}^2$; 居里温度 85° ; D33 压电系数 65; 极化方向为 Z 向(极化强度 $2000 \text{ V}/\text{mm}$). 材料经过工艺加工减薄到 $< 30 \mu\text{m}$, 通过表面处理尽量降低表面损伤使正切损耗达到 $\tan \delta < 0.6\%$, 用在探测器上已极化的 PZT 铁电材料在工作时不需另外加极化电场.

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. 同时为提高铁电探测器的性能必需降低热导提高热容, 热释电探测器是电容性的, 其性质显示出电容 C_c 和损失电阻 R . 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

$$\epsilon \Phi \delta^{-1} [1 + \omega^2 (\frac{\xi}{\delta})^2]^{-1/2} = \Delta T_d \quad (3)$$

$$V_s = \frac{\Phi A R}{(1 + \omega^2 R^2 C_c^2)^{1/2}} \cdot \frac{d(\Delta T_d)}{dt} \quad (4)$$

式中 ϵ 为发射率, ω 为 Φ 的角频率, ξ 为热容, δ 为热导. 从式(4)可以看出, 其他条件不变的情况下, 热导越小、热容越大, 热释电信号电压 V_s 越高, NETD 值也就越小. 通常情况下在读出电路和热释电材料之间采用钢柱连接, 但钢的热导较大, 因为 $\rho_m = 0.816 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 同时氮气和 PZT 的热传导系数比较小, 它们的热导与钢柱的热导相比是相当的, 可以忽略不计. 在满足热时间常数要求的前提下, 减小钢柱热导是提高器件性能的重要途径. 目前钢柱参数见表 1.

表 1 钢柱物理参数

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

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

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. 将铁电材料减薄至 $50 \mu\text{m}$ 然后进行光刻、离子束刻蚀, 后从材料的另一面进行减薄. 已经获得了接近 $30 \mu\text{m}$ 的刻蚀深度, 效果如图 2. 由于采用的光刻胶掩膜厚度最多只能承受离子束刻蚀 $20 \mu\text{m}$ 厚, 不能使材料完全网格化.

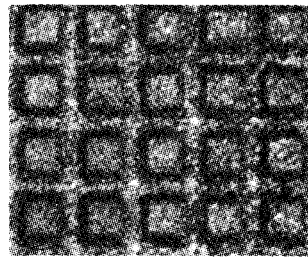


图 2 刻蚀效果图

Fig. 2 The photo of iron beam etching

5 读出电路

铁电红外焦平面阵列的工作性能除了与探测器性能, 如光谱响应、噪声谱、均匀性有关外, 还与探测器输出信号的电路性能有关, 如读出电路的电荷处理能力, 动态范围、串扰、噪声抑制等. 所以, 制约我国非制冷铁电红外焦平面器件技术发展的不仅仅是探测器本身, 读出电路也同样制约着它的发展.

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. 就目前集成电路的发展趋势来看, CMOS 电路的是未来 5 年内的主流技术, 并且工艺较为成熟, 加工成本相对较低, 是读出电路设计的首选. CMOS 电路的主要噪声是由读出电路像元内 MOS 管阈值电压的不均匀性引起的固定模式噪声, 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有效地降低了这一噪声. 利用该器件得到的红外图像见图 3.

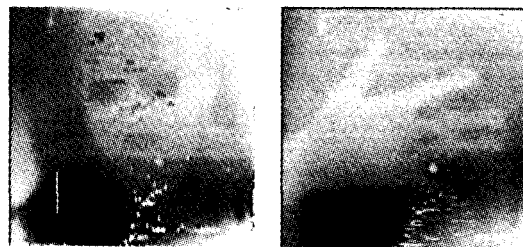


图 3 器件样品及原始热像

Fig. 3 UPFA sample and raw IR

6 结论

本文介绍的铁电混合式焦平面器件在 2004 年研制成功,采用锆钛酸铅(PZT)体材料、 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 探测元尺寸的非制冷焦平面探测器,其探测率达到 $D^* \sim 1 \times 10^8\ \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

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仍存在问题,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.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.

参考文献

- 1 Evans S B, Terrence Hayden, Raytheon System Company. High MTF hybrid ferroelectric IR FPA. *Proc of SPIE*, 1998, **3379**:36~46
- 2 Sung Tai-Ping, Yuna-Lung Chin, Wen-Taw, *et al.* Novel CMOS readout techniques for uncooled pyroelectric. *Proc of SPIE*, 1998, **3360**:60~72
- 3 Watton R, Manning P A. The design of low-noise arrays of MOSFET for proelectric array readout. *Proc of SPIE*, 1987, **807**:98~105
- 4 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
You Z, Li T. *Acta Optica Sinica*, 2002, **28**(1):31~35
- 5 杨新军,王肇圻,孙强,等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计. *光子学报*, 2005, **34**(4):573~576
Yan X J, Wang Z Q, Sun Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):573~576
- 6 王柄键,刘上乾,周慧鑫,等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法. *光子学报*, 2005, **34**(2):299~301
Wang B J, Liu S Q, Zhuo H X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):299~301

Latest Development of Hybrid Uncooled Pyroelectric IR FPA

Hu Xu^{1,2}, Tai Yunjian², Huang Chengcai², Cai Yi²

1 *Communication Engineering College of chongqing university, Chongqing 400044*

2 *Kunming Institute of Physics, Kunming 650223*

Received date: 2005-01-03

Abstract 128×128 element Hybrid Uncooled Pyroelectric IR FPA, which was developed by Kunming Institute of Physics, was introduced in this paper. First, the national and oversea development of Hybrid Uncooled Pyroelectric IR FPA and hybrid structure was used in the FPA were presented, then the key factor that effected on the FPA's performance was analyzed. Not only were the material's electrics and physical characteristic that were applied in the FPA, but also heat isolation structure and ROIC technology were discussed. Some IR explicit picture getting from the IR FPA was given. At last, experimentation result and some methods that improving performance was applied in the future were discussed and analyzed.

Keywords IR; FPA; Uncooled; Pyroelectric



Hu Xu was born in Kunming, Yunnan, in 1971. He received the Master's Degree from the Department of opt-electronics Engineering, Chongqing University in 2002. Currently he is pursuing Ph. D. degree in Chongqing University. Jince 1994, he has been a researcher in the Kunming Institute of Physics. His title is the vice director of FPA Detector Development Center. He majors in IR detector and IR image electronics.