

热释电非制冷红外焦平面现状及发展趋势

陈实,张海波,姜胜林,曾亦可,刘梅冬

(华中科技大学 电子科学与技术系,湖北 武汉 430074)

摘要:一维和二维阵列的热释电非制冷红外焦平面非常适合应用于热成像。混合式的 BST 铁电探测器降低了成本,市场潜力巨大。分析了热释电非制冷红外焦平面阵列探测技术的优势,介绍了热释电非制冷红外探测器工作原理及热释电非制冷红外焦平面阵列对探测材料的要求,指出了混合式及单片式热释电非制冷红外焦平面阵列发展趋势。制备高一致性和高性能的大阵列的探测元是发展非制冷红外焦平面的关键,针对我国在热释电非制冷红外焦平面阵列研究方面存在的问题,提出了下一步研究的方向及重点。

关键词:非制冷红外焦平面阵列; 热释电性; 发展趋势

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2006)04-0419-05

Status and trend of pyroelectric uncooled infrared focal plane arrays

CHEN Shi, ZHANG Hai-bo, JIANG Sheng-lin, ZENG Yi-ke, LIU Mei-dong

(Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, China)

Abstract: Uncooled infrared focal plane arrays (UFPA) exploiting the pyroelectric effect had considerable potential for thermal imaging applications when used in 1-D and 2-D arrays. With hybrid barium strontium titanate (BST) ferroelectric detectors lowering cost, the markets were exploding. The technique advantages were analyzed, the principle and requirements of materials of uncooled infrared focal plane arrays fabricated by pyroelectric materials were introduced, the development trend in hybrid and chip pyroelectric uncooled infrared focal plane arrays was pointed out. The preparation of detector arrays of high uniformity and high performance, in large scale, was considered as the key element in the FPAs development. The problem, the trends in research direction and the key fields of UFPA in China were put forward.

Key words: Uncooled infrared focal plane arrays; Pyroelectric properties; Future trends

收稿日期:2005-10-11; 修订日期:2005-12-03

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)(2004CB619300);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0703)

作者简介:陈实(1967-),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要从事铁电薄膜制备及应用研究。Email:changhb@gmail.com

0 引言

红外探测技术是近年来局部战争侦察使用的尖端技术之一^[1]。随着“冷战”的结束,红外探测器市场正由原来的军用型转向民用型。日益增长的民用市场需要高性价比、高可靠、低功耗、便携式、无需制冷的焦平面阵列(FPA),主要应用在对探测性能要求并不苛刻的领域,如环境监测、安全消防等。因而具备上述特点的非制冷焦平面阵列(UFPA)在 20 世纪末获得了广泛地研究,并在短时间内取得了一系列突破性的进展:摆脱了机械扫描机构和制冷器;缩短了启动时间;提高了稳定性和使用寿命;系统成本降低了 2 个数量级,可与可见光 CCD 视频系统相媲美等。通过加大阵列规模和改善信号处理的方法,目前部分 UFPA 系统所得的目视像质与制冷型 FPA 区别很小^[2]。非制冷型红外探测器先后经历了温差电偶、温差电堆、高莱盒、热敏电阻微测辐射热计等形式。20 世纪 60 年代中期开始对热释电红外探测器进行研究,70 年代中期采用热释电陶瓷制备了热释电 UFPA。20 世纪 90 年代以来随着材料性能和制备工艺的进展,大规模二维凝视阵列成为现实。

1 热释电探测器原理

热释电材料经过近几十年的发展,其种类大为增多,制备技术业已成熟,热释电效应也有了透彻的、机理性的解释^[3]。对热释电材料的探测原理是:入射辐射使材料的温度发生变化,引发材料的自发极化强度变化,在垂直于自发极化方向的两个晶面出现感应电荷。在自由电荷与感应电荷中和之前,通过外电路将其引出,利用感应电荷的变化来测量光辐射通量^[4]。由于热释电材料的输出阻抗很高,故一般采用高输入阻抗、低输出阻抗、低噪声的 JFET 作为源极跟随器与其匹配,以达到阻抗变换的目的,实际应用中也有采用反相串联或并联的双元补偿结构敏感元或电桥结构的四元敏感元来提高探测灵敏度^[5-7]。

由于所有的铁电材料都具有热释电性,研究探测材料的铁电性比研究热释电性要更为容易。与普通铁电效应不同,居里点(T_c)接近于室温的铁电材料,同时利用了热释电效应和介电常数在 T_c 附近及直流偏

压下具有极大变化率的特性,故又称为场增强热释电效应。有研究者也将热释电 UFPA 称为介电测辐射热计模式(DB 模式)FPA^[8,9],即在制备热释电探测元的过程中,只测试其介电温度系数(TCD),而不测试其热释电系数 γ ,因为后者的测试过程比较复杂。

与其他热电型探测器不同,热释电探测器是响应于温度随时间的变化率而不是温度值本身。其工作过程不需要建立热平衡,只响应于斩波、脉冲或其他形式的调制辐射源,而不随时间变化的稳定背景辐射和非交流成分的环境噪声响应可以忽略。此外,热释电探测器还具有室温下工作频率及光谱响应宽(红外到毫米波,通过使用适宜的黑体涂层来吸收辐射,光谱响应范围还可进一步扩展)、响应速度快、探测率较高、积分灵敏度极高等特点,因此发展日益迅速^[10]。

2 热释电 UFPA 对探测材料的要求

通常利用热释电系数 γ 和几个优值(FOM)对热释电探测材料的性能进行评价,其表达式分别为:

$$\text{热释电系数: } \gamma = dP_s/dT \quad (1)$$

$$\text{电流响应率优值: } F_I = \gamma/C_V \quad (2)$$

$$\text{电压响应率优值: } F_V = \gamma/(C_V/\epsilon_r) \quad (3)$$

$$\text{探测率优值: } F_D = \gamma/(C_V \sqrt{\epsilon \tan \delta}) \quad (4)$$

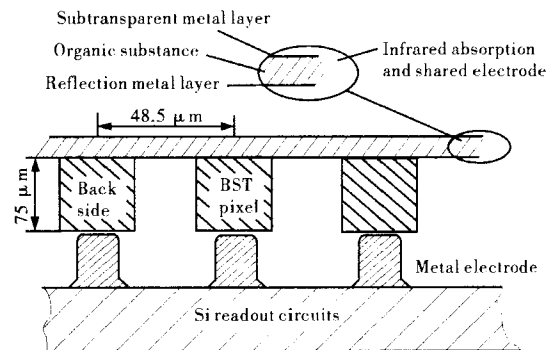
式中: C_V 为热释电探测材料体积比热; ϵ (ϵ_r) 为绝对(相对)介电常数; $\tan \delta$ 为介电损耗。由上式可以看出,在选择热释电探测材料时,要求有较大的热释电系数,较低的介电常数、介电损耗和体积比热^[11]。但这种选材要求往往是针对敏感元面积相对较大的单元或小阵列探测器。对于热成像系统,尤其是高密度的凝视型 UFPA,每个敏感元的面积小于 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,像元间距小于 $50 \mu\text{m}$,而敏感元的电容应接近或稍大于前置放大器的输入电容(一般为 pF 级),才能与读出电路(ROIC)匹配良好,并可降低像元间横向耦合电容,减少串音^[12]。这意味着敏感元必须薄膜化或材料本身具有较大的介电常数,即 UFPA 使用的材料不仅要求热释电系数大,介电常数也要比较高。一般而言,体材料比相应薄膜材料的相对介电常数大;无机比有机薄膜材料的热释电系数高出约 1 个数量级,相对介电常数高出约 1~3 个数量级。虽然有机薄膜热释电系数小,但由于致密、制备工艺简单、热应力小、热

导率低和具有一定的电压响应率等优点,也是制备单元或小阵列探测器的理想材料。有机材料与 PbTiO_3 等热释电系数较大的无机材料按一定比例混合成为有机/无机复合热释电薄膜材料,兼用两者的优点,是一种前景良好的制备大阵列 UFPA 的材料。

3 混合式热释电 UFPA 的发展

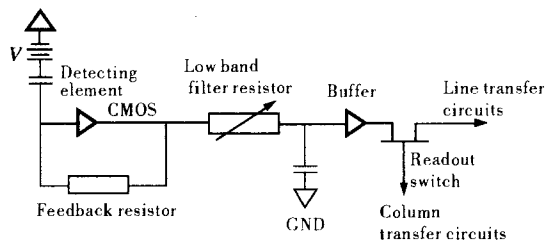
研制热释电非制冷红外焦平面阵列投资最大、发展最快的为美国,日本和欧洲各国也进行了这方面的研究^[13]。体材料方面,美国 Loral 公司用单晶 LiTaO_3 材料制备出 192×128 元的热像仪,使用透镜和 30 Hz 显示频率时 NETD 可低于 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[14]。美国德州仪器(TI)公司在 1979 年采用 $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ (BST) 陶瓷切片研制成 100×100 元热释电混合式阵列;1993 年通过实施 LOCUSP 项目制备出 245×328 元和 245×454 元 BST 混合型 UFPA, 并以此为基础生产了几种非制冷热像仪,目前该产品已投入批量生产;1996 年每年生产 $\Phi 150 \text{ mm}$ 的 BST 陶瓷材料达到 4.8 万片,每片能制成 245×328 元非制冷红外焦平面阵列 42 个,即阵列年产量达 200 万片;用该陶瓷片每年能生产热释电混合式非制冷红外热像仪 57 600 台以上,其样机的性能如表 1 所示^[15-17]。BST 混合型 UFP 的 Z 制作方法是:采用热压陶瓷工艺制备掺杂的、理想配比的 BST

陶瓷圆片,经研磨、抛光,把 BST 陶瓷的厚度减小到 $25 \text{ } \mu\text{m}$ 。然后用 Nd:YAG 激光蚀刻或等离子束技术网格化阵列,蚀刻残余物用酸液腐蚀除去,并在氧气中退火以保持原来的化学计量比。再通过钢柱倒焊技术将阵列与硅电路互联,其混合式结构及读出电路如图 1 所示。事实证明选择 BST 陶瓷制作 UFPA 是比较成



(a) 阵列像元结构

(a) UFPA pixel structure



(b) 读出电路单元

(b) Readout circuits

图 1 混合式 BST 陶瓷 UFPA 像元结构及读出电路单元图

Fig.1 Hybrid BST ceramic UFPA pixel structure and readout circuits

表 1 美国 TI 公司 BST 热释电陶瓷混合式 UFPA 样机的性能参数

Tab.1 Parameter of TI BST hybrid UFPA

Parameter	Value
Total pixels	245×328
Pixel pitch	48.5 μm
Pixel thickness	25 μm
Defective pixels	<100
Absorption coefficient	95%
Operating temperature	22 $^\circ\text{C}$
Optical filling factor	100%
Readout ICs	1 μm CMOS
Heat-insulating property	$2 \times 10^5 \text{ kW}^{-1}$
Pyroelectric coefficient	$630 \text{ nCcm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Dielectric constant	10 000
Capacitance	3 pF
Thermal time constant	15 ms
Bias voltage	15 V
Efficient temperature factor	12%
NETD	0.047 $^\circ\text{C}$
Responsivity	$85\ 000 \text{ VW}^{-1}$
Specific detectivity D^*	$2.5 \times 10^8 \text{ cm}(\text{Hz})^{1/2}\text{W}^{-1}$

功的。BST 陶瓷材料容易制备、价格较低,材料的均匀性良好,电阻值可与硅 CCD 电路相匹配,不易老化,易于掺杂改性。该阵列的缺点是:(1) 陶瓷材料难以减薄,像元厚度不均匀,灵敏度不高,系统性能不可靠;(2) 钢柱几乎没有热绝缘作用,这对于制作高性能、高密度、大面积的集成热释电 FPA 是不合适的。英国 GEC-Maconi 材料技术部也采用 BST 陶瓷制成 100×100 元、 256×128 元和 384×248 元 FPA 热像仪,并已经投放市场,此外还研究过改性 PbZrO_3 、 $\text{Pb}(\text{ScTa})\text{O}_3$ (PST)、 BaTiO_3 等热释电材料^[18,19]。中科院上海硅酸盐研究所采用常规工艺制备的 PZNFST 陶瓷是性能优良的热释电材料,性能接近于单晶材料。由于热释电材料的性能随掺杂组分的变化可在很宽的

范围内调节,进一步开发材料参数符合理论值的系统是完全有可能的,这为进一步研究实用化的 FPA 做了材料准备^[20]。目前,我国虽有少数公司和厂家生产陶瓷与单晶热释电红外探测器,但技术水平和生产能力均未达到市场要求,且其产品性能也比热释电薄膜红外探测器差。

4 热释电薄膜单片式 UFPA 的发展

热释电薄膜单片式 UFPA 代表了凝视阵列摄像发展的新途径,是非制冷红外热成像仪的关键部件^[21]。它包含两个功能部分:灵敏元阵列与信号处理电路(见图 2)。两者都可在普通规模的集成电路工艺线上完成,不必依靠极其昂贵的超大规模集成电路(VLSI)制造设备。

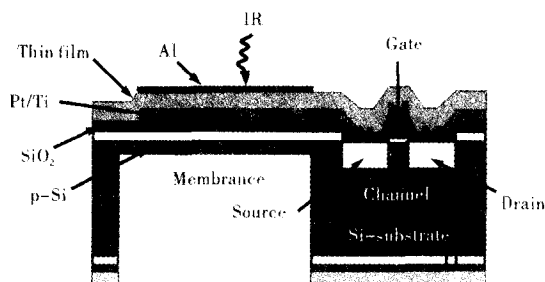


图 2 热释电薄膜单片式 UFPA 的单元结构图

Fig.2 Modular construction of pyroelectric thin film chip UFPA

与光子型阵列相比,虽然热释电薄膜单片式 UFPA 的灵敏度较低,但可通过加大阵列规模和改善信号处理的方法等得到改进。目前灵敏度已优于 0.04 K,这已超过了现役的某些扫描系统性能。热释电薄膜 UFPA 的灵敏度主要取决于材料热释电系数和像元/衬底热阻。热阻越大,灵敏度就越高,这是所有单片式 UFPA 的共性。目前国内外普遍采用的热绝缘措施有:(1) 像元/衬底间镂空结构,四点或两点支撑臂。该措施无疑是效果最佳的,但工艺复杂,且像元能承受的加速度有限;(2) Si_3N_4 和 SiC 等热导率低的无机材料作为热阻;(3) 孔隙率达 95% 以上的 SiO_2 气溶胶(aerogel)作为绝热和支撑材料。将来可以考虑以相容性很强的有机/无机复合材料来作为热阻^[22,23]。

与其他热电型 UFPA(如热敏电阻式)相比,热释电薄膜 UFPA 的灵敏元本身可作为一个滤波器。就其结构而言,可以将一定量的噪声旁路分离掉,故其噪

声小于其他类型 UFPA 的噪声,热时间常数 τ 也相对较小。与热释电体材料(单晶和陶瓷)混合式 UFPA 相比,热释电薄膜继承了热释电陶瓷易于制备和掺杂改性等优点,单片式 UFPA 还具有以下优点:(1) 灵敏元薄,体积比热小,灵敏度高;(2) 响应速度快;(3) 易与半导体 IC 平面工艺兼容,能显著提高传感器集成度;(4) 性价比更高。

20 世纪 90 年代初期热释电薄膜 UFPA 进入实用化阶段,近年来获得了快速发展。1988 年日本用射频磁控溅射法研制出 128 元线列热释电薄膜红外探测器。1995 年日本松下公司已将 La 掺杂 PbTiO_3 (PLT) 薄膜 8 元线列非制冷红外探测器作为变频空调控制器的主要部件,取得了商业应用。该公司还推出了一种测试人体移动的热释电薄膜非制冷红外探测器,它通过将薄膜探测器装置与平面多光束衍射透镜结合,能够很方便地应用于变频空调等家电设备。1999 年瑞士已用 PZT 热释电薄膜 150 元线列非制冷红外探测器做成光谱仪,用来分析丁烷和一氧化氮气体。1994 年美国报道了 TI 公司用 Sol-Gel 技术制备的 PT 热释电薄膜,采用 $3\ \mu\text{m}$ NMOS 集成电路工艺研制出单片式 64×64 元 UFPA 原型。该器件敏感元尺寸为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$,电压响应率为 $1.2 \times 10^4\ \text{VW}^{-1}$,噪声电压为 $0.3 \pm 0.1\ \mu\text{VHz}^{-1/2}$,归一化探测率 D^* 为 $2 \times 10^8\ \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$;该公司现在正在研制 245×328 元 BST 热释电薄膜单片式 UFPA。国外从事热释电薄膜 UFPA 研制的部门还有美国 Infrared Solution 公司,英国 GEC 公司,德国 DIAS 应用传感技术公司与 Ultrakust 红外传感器公司^[24]。

国内目前对于热释电薄膜 UFPA 的研究主要集中在提高热释电薄膜的性能和结构设计上,器件制备关键工艺也有所突破。1980 年后,国内采用 Sol-Gel、多离子束反应溅射、射频磁控溅射、MOCVD 和 PLD 等方法制备出 $\text{Ba}(\text{Sr},\text{Ti})\text{O}_3$ 、 PbTiO_3 、PLT、PZT 和 PST 等钙钛矿型热释电薄膜^[25,26]。

5 存在的问题及发展的重点

由于起步晚,投资少,工艺制备技术落后,我国热释电非制冷红外探测器阵列的研究与国外先进水平差距很大,主要表现在:

(1) 着重于薄膜制备技术,器件研究规模不大

对于热释电非制冷红外焦平面技术仍停留在薄膜制备和小阵列器件制作。热释电非制冷红外焦平面技术是一项系统工程,涉及到半导体材料制备,微结构加工工艺,大规模读出电路等多项技术,薄膜制备只是其中最基础的一项。

(2) 阵列规模较小

我国的非制冷红外焦平面仍然停留在小阵列规模上,如 32×32 元和 128×128 元等,而国外的 640×480 元已经研制成功并装备成型,因此,不能再停留在小规模面阵阶段,应学习法国,由国家投入大量人力和物力,直接研制具有市场前景的 320×240 元和 640×480 元大规模面阵阵列。

(3) 工艺有待于进一步标准化

热释电非制冷焦平面阵列由于涉及大量的半导体工艺,因此工艺比较特殊,如薄膜的图形化、牺牲层结构去除等,需要将制作工艺标准化,尽量采用与CMOS读出电路相兼容的工艺。

(4) 读出电路研究有待于进一步加强

热释电非制冷红外焦平面技术由于涉及到国防领域,高性能的器件不能从国外直接购买或委托设计和加工,我国对于非制冷红外焦平面读出电路的理论研究和实际设计经验都明显不足,读出电路功能单一,应走模块化和功能化的设计路线。

根据非制冷红外热像仪的市场需求,未来非制冷红外热成像技术的主要发展方向为:(1)发展高性能的非制冷红外焦平面阵列,主要用于满足军事装备的需要;(2)发展低成本的非制冷红外焦平面阵列,适用于对分辨率要求不太高的场合,主要市场在民用领域^[27]。“十一五”期间国家应加大对非制冷热释电焦平面的基础研究和产品开发的投入,力争完成 160×120 、 320×240 元非制冷热释电红外焦平面探测器的设计,并研制出芯片,形成国产 160×120 、 320×240 元非制冷型红外焦平面阵列芯片的小批量生产能力;开展高性能、大尺寸、易加工热释电陶瓷材料及薄/厚膜材料制备技术的工程化研究,确定大面积阵列的稳定制备工艺。在此基础上,结合微电子工艺开展小尺寸像元制备技术的研究,得到高性能大阵列像元的制备技术。

参考文献:

- [1] CHEN Bo-liang. Important applications of IRFPA imaging devices [J]. *Infrared and Laser Engineering* (陈伯良. 红外焦平面成像器件的重大应用. *红外与激光工程*), 2005, **34**(2): 168-172.
- [2] WOOD R A, FOSS N A. Micromachined bolometer arrays achieve low-costing imaging [J]. *Laser Focus World*, 1997, 6: 101-106.
- [3] SHAO Shi-ping. *Pyroelectric Effects and Its Application* [M]. Beijing: Ordnance Industry Publishing House (邵式平. *热释电效应及其应用*. 北京: 兵器工业出版社), 1994: 1-7.
- [4] PHAM L, TJHEN W, YE C, et al. Surface-micromachined pyroelectric infrared imaging array with vertically integrated signal processing circuitry [J]. *IEEE Trans on Ultra Ferr and Freq Cont*, 1994, **41**(4): 552-555.
- [5] MARK W L, KEITH W D, RAYMOND T P, et al. Low noise JFETs for room temperature X-ray detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods Physics Research A*, 1996, **380**: 318-322.
- [6] MARSTON R. Junction field-effect transistors [J]. *Electronics Now*, 1993, **64**: 64-70.
- [7] VALENTI M. Infrared sensors hands-off temperature measurement [J]. *Mechanical Engineering*, 1991, **113**(10): 40-45.
- [8] NODA M, HASHIMOTO K, KUBO R, et al. A new type of dielectric bolometer mode of detector pixel using ferroelectric thin film capacitors for infrared image sensor [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, **77**(1): 39-44.
- [9] KRUSE P, SKATRUD D. Uncooled infrared imaging arrays and systems [J]. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, **47**: 144-154.
- [10] LIU W G, ZHANG L Y, YAO X. Properties of PLT thin film pyroelectric detectors I [J]. *Current Responsivity Infrared Phys*, 1995, **36**: 857-860.
- [11] BERTUCCIO G, FASOLI L, SAMPIERTRO M. Stability of amplification in detectors with integrated electronics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1996, **380**: 331-334.
- [12] ZHONG Wei-lie. *Ferroelectrics Physics* [M]. Beijing: Science Publishing House (钟维烈. *铁电体物理学*. 北京: 科学出版社), 1996.
- [13] SHAO Shi-ping. Status of uncooled IR FPA [J]. *Infrared and Laser Engineering* (邵式平. 非制冷长波红外焦平面阵列现状. *红外与激光工程*), 1997, **26**(4): 6-11.
- [14] GALLO M A, WILLITS D S, LUBKE R A. Low cost uncooled IR sensor for battlefield surveillance (下转第 436 页)

- hods in *Physics Research*, 2001, **473**(1-2):83-85.
- [2] HU Y, SOLERE J L, LACHARTRE D, et al. Design and performance of a low-noise, low-power consumption CMOS charge amplifier for capacitive detectors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(1):119-123.
- [3] TEDJA S, van der SPIEGEL J, WILLIAMS H H. A CMOS low-noise and low-power charge sampling integrated circuit for capacitive detector/sensor interfaces[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1995, **30**(2):110-119.
- [4] HU Y, DEPTUCH G, TURCHETTA R, et al. A low-noise, low-power CMOS SOI readout front-end for silicon detectors leakage current compensation with capability [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, **48**(8):1022-1030.
- [5] RANDAZZO N, RUSSO G V, PRESTI D L, et al. A four-channel, low-power CMOS charge preamplifier for silicon detectors with medium value of capacitance [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, **44**(1):31-35.
- [6] BAKER R J, LI H W, BOYCE D E. *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation*[M]. New York: John Wiley, 1998.
- [7] RAZAVI B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [8] GUO C, SCHMITT P, DEPTUCH G, et al. A fully integrated, low noise and low power BiCMOS front-end readout system for capacitive detectors [J]. *International Journal on Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2001, **28**(3):211-223.
- [9] WURTZ L T, WHELESS W P Jr. Design of a high-performance, low noise charge preamplifier [J]. *IEEE Trans Circuits Syst I*, 1993, **40**(8):541-545.

(上接第 423 页)

- [C]//*Infrared Technology XIX*, 1993, **2020**:351-362.
- [15] BUTLER N R, IWASA S. Solid state pyroelectric imager [C]//*Proceeding of SPIE, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays II*, 1992, **1685**:146-154.
- [16] PIOTROWSKI J, GAWRON W, DJURIC Z. New generation of near-room-temperature photodetectors [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(5):1413-1421.
- [17] FLANNERY R E, MILLER J E. Status of uncooled infrared imagers [C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing III*, 1992, **1689**:379-395.
- [18] OWEN R, BELCHER J, BERATAN H, et al. Productibility advances in hybrid uncooled infrared devices [C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays IV*, 1998, **2746**:231-234.
- [19] XIAO Ding-quan. Some aspects of recent progress on ferroelectricity and ferroelectric materials [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics* (肖定全. 当前热释电学和热释电材料研究的几个问题. *压电与声光*), 1996, **18**(4):45-50.
- [20] LIU Rui-bin, LIN Sheng-wei, QU Cui-feng, et al. Pyroelectric ceramics with the desired properties for application on information on focal plane thermal imaging arrays [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* (刘瑞斌, 林盛卫, 瞿翠凤, 等. 红外焦平面阵列热成像系统用陶瓷热释电材料的研制. *硅酸盐学报*), 1995, **23**(3):327-329.
- [21] HASHIMOTO K, NODA M, KUBO R, et al. Detector pixel in dielectric bolometer mode based on ferroelectric thin film capacitors for uncooled image sensor [C]//*Technical Digest of the 16th Sensor Symposium*, 1998:69-72.
- [22] NELSON E H. Method of Making a Thin Film Detector with an Aerogel Layer: US, 5478425 [P]. 1995-12-26.
- [23] TAKAVAMA R, TOMITA Y, FUJII S, et al. Pyroelectric infrared image sensor [J]. *National Technical Report*, 1993, **39**(4):474-482.
- [24] WATTON R. Ferroelectric materials and IR bolometer arrays from hybrid arrays towards integration [J]. *Integrated Ferroelectrics*, 1994, **4**:175-186.
- [25] YI G, WU Z, SAYER M. Preparation of Pb(Zr,Ti)O₃ thin film by Sol-Gel processing: electrical, optical and electrooptic properties [J]. *J Appl Phys*, 1988, **64**:2717-2723.
- [26] HUANG Z, ZHANG Q. RF-sputtered PLT thin films for infrared rare sensor arrays [J]. *Ferroelectrics*, 1999, **225**:57-66.
- [27] XING Su-xia, ZHANG Jun-ju, CHANG Ben-kang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering* (邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状. *红外与激光工程*), 2004, **33**(5):441-444.