

弛豫铁电单晶热释电探测器读出电路的设计

王 将^{1,2} 景为平²

(¹中国科学院上海技术物理研究所传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050)
²南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室, 江苏 南通 226019)

摘要 以 $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN- x PT 或 PMNT) (PMN- x PT, 或 PMN-PT) 为代表的弛豫铁电单晶具有非常高的热释电系数、比较低的热扩散系数、比较稳定的化学性能, 是一种综合性能优异的热释电材料。利用弛豫铁电单晶可以制备出高性能的红外光传感器, 针对用这种新型热释电材料制成的红外光传感器, 研究了相关的读出电路, 探索了抑制读出电路噪声的方法, 研制出了 8 通道的微弱电流读取电路。

关键词 探测器; 热释电; 弛豫铁电单晶; 读出电路; CMOS

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.020401

Design of Readout Circuit for Pyroelectric Detector Based on Relaxor Ferroelectric Single Crystals

Wang Jiang^{1, 2} Jing Weiping²

¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China
² Jiangsu Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit Design, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract Relaxor-based ferroelectric single crystals, such as $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN- x PT, or PMNT) single crystals, exhibit large pyroelectric response, low thermal diffusivity and high temperature stability. To fabricate high performance infrared detectors with relaxor-based single crystals, the related readout circuit is investigated to increase signal-to-noise ratio, and 8×1 CMOS readout circuit is fabricated to gain very weak current.

Key words detectors; pyroelectric; relaxor ferroelectric single crystals; readout circuit; CMOS

OCIS codes 040.1240; 040.6808; 230.0040

1 引言

20 世纪 70 年代以来, 红外探测技术的发展迅猛, 热释电红外焦平面阵列因其优越的性价比而在非致冷红外焦平面阵列中倍受关注, 是两种主要的非致冷红外焦平面阵列之一。但是传统的热释电材料如 TGS, BST, PST 或热释电系数、探测优值偏低, 或容易潮解, 或使用温度有限, 或需要施加偏置电场, 这些局限大大限制了热释电探测器的使用范围^[1~3]。近年来, 中国科学家率先发现以 $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN- x PT 或 PMNT) (PMN- x PT, 或 PMN-PT) 为代表的弛豫铁电单晶具有非常优异的热释电综合性能。PMNT 新型热释电材料与传统材料相比具有众多优点^[4~6], 如室温下热释电系数超过 $12.8 \times 10^{-4} \text{ C}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 探测能力优于 LiTaO_3 和 TGS 等热释电材料; 具有比较低的热扩散系数, 非常有利于热图像的贮存和处理, 提高横向分辨率, 这对于红外成像仪非常重要; PMNT 单晶的介电常数适中 (可以根据组分、掺杂和结晶学取向在 400~7000 范围内调节), 有利于传感器与放大器的匹配, 从而可调节、增加传感器的像素; PMNT 单晶的居里点相对较高, 使用时不需加偏压, 矫顽场相对较大, 不易退极化, 室温下材料物化性能均匀稳定等。这种新型热释

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期:** 2010-10-20

基金项目: 传感技术联合国家重点实验室 (SKT0804) 资助课题。

作者简介: 王 将 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事红外焦平面读出电路方面的研究。E-mail: wa011@163.com

导师简介: 方家熊 (1939-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事红外传感器技术方面的研究。

E-mail: jxfang@mail.sitp.ac.cn

电单晶材料的实际应用,将十分有利于热释电探测器的发展。然而,如何选取适当的电路工作模式和结构,抑制电路的噪声,分析探测器和读出电路的接口,提取探测器的微弱信号是亟待解决的问题。

本文对这种新型弛豫铁电热释电材料读出电路进行了设计,分析和讨论热释电读出电路工作模式和结构的选取,并给出了电路方案,仿真和实验结果,最后进行了流片测试。

2 热释电探测器等效电路及读出电路的选择

热释电材料通过热释电效应产生电信号,原理如图 1 所示,红外信号被探测器中的热释电元件接收,产生热效应,温度升高 ΔT ,此过程中极化电荷减少,自由电荷变化不大,故净电荷增加;当温度稳定于 $T+\Delta T$ 以后,极化电荷不变,自由电荷却减少,直至为零。当红外信号被撤去后,温度降低,仍有类似过程。探测器正是把这种净电荷的变化作为输出信号^[6]。热释电探测器芯片在电学上相当于一个低损耗电容,等效电路可以用一个电流源并联上一个电阻和电容表示。

所以根据上述过程,热释电电流可表示为

$$\Delta \tilde{T} = \frac{\alpha \tau_F \bar{\phi}_s}{G_T (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2}}, \tag{1}$$

$$\tau_T = H_p / G_T, \tag{2}$$

$$i_p = \frac{dQ}{dt} = PA_s \frac{\Delta T}{dt}, \tag{3}$$

$$\tilde{i}_p = \omega p A \frac{\alpha \tau_F \bar{\phi}_s}{G_T (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2}}, \tag{4}$$

式中 $\tau_F \bar{\phi}_s$ 为接收到的辐射, α 为材料对辐射吸收的系数, G_T 为环境的热导, ω 信号调制频率, τ_T 为热时间常数, p 为热释电系数。

选取热释电探测器信号的放大输出形式要着重考虑。对于热释电读出电路,放大输出形式主要有两种:电压放大器和电流放大器^[7]。电流放大器形式的示意图如图 2 所示。对于电压模式来说,需要一个阻值很大的偏压电阻来控制输入管的工作点,这个电阻通常在 100 M Ω 以上,在 CMOS 工艺上很难把这么大的电阻集成在电路里面。电流模式则避免了这个缺陷,而且电流模式可以工作在更高的频率下。此外与电压模式相比,电流放大器形式还具有更高的热释电响应率,更低的电时间常数 τ_E , 低的输出偏移电压^[8,9]。所以本文采用了电流积分形式的放大读出电路。其中输入级采用了电容反馈互阻抗放大器 (CTIA) 结构,相比源极跟随器 (SFD) 结构,CTIA 输入级读出电路具有较多的信号处理功能,能提供较好的探测器偏压控制,又具备了满阱容量大、注入效率高,噪声低的特点,是实现高灵敏探测的比较理想的方案^[10]。可是因为其复杂的结构,较多的 MOS 管带来了大的功耗以及电路噪声,所以在设计中如何抑制电路自身的噪声和降低电路功耗是要解决的难题。

3 弛豫铁电单晶热释电读出电路的设计

如图 3 所示,弛豫铁电单晶热释电读出电路包括 CTIA 输入级、CDS 双采样保持电路、多路输出级等三部分。CTIA 输入级包括一个运算放大器和反馈积分电容,和一个复位晶体管。积分时间开始前,复位脉冲通过复位管对积分电容 C_{int} 复位。积分时间开始后,光电流

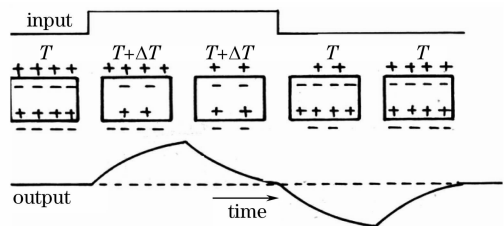


图 1 热释电原理示意图

Fig. 1 Operating principle of pyroelectric devices

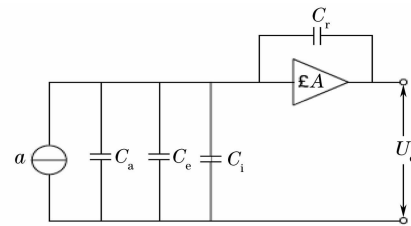


图 2 热释电探测器信号电流放大器形式

Fig. 2 Current-mode type pyroelectric readout circuit

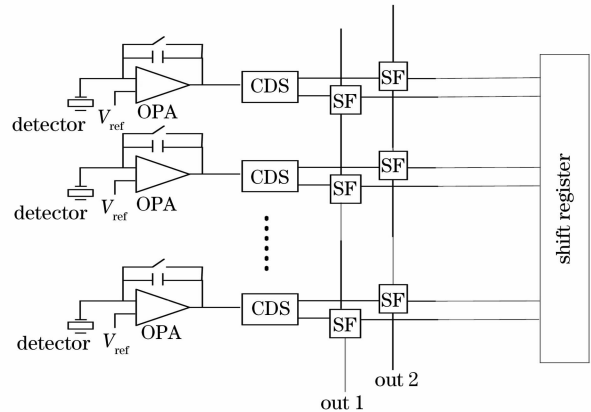


图 3 CTIA 输入级结构读出电路

Fig. 3 Schematic diagram of the readout circuit

累在积分电容上,积分时间结束后,采样读出。运算放大器一般工作在反馈状态下,利用其较大的增益来获得稳定的探测器偏置^[11,12]。

输入级运算放大器使用二级运算放大器,电路结构如图4所示,包括一个差分输入级,共源级以及RC频率补偿电路。差分级提供大增益,共源级则提供大的输出摆幅。为了降低电路输入级的噪声并最大化电路转换速率,使用了PMOS差分输入级。RC频率补偿的电阻使用CMOS传输门,相比单独的NMOS或PMOS管,在其工作时,当输出电压变化,NMOS和PMOS的电阻往相反的方向变化,故其并联值近似恒定,而且比无源电阻更精确,版图面积更小。

在低噪声应用中,对运算放大器的输入参考噪声(等效输入噪声)要求是很高的。CTIA的噪声来自主要差分放大器的输入晶体管,差分放大器易导致不需要的漂移。噪声包括 $1/f$ 噪声、热噪声和KTC噪声(对积分电容进行复位引起)。对于 $1/f$ 噪声的降低,主要的方法是增加晶体管的面积,如果 WL 增加而 W/L 保持恒定(W 为MOS管的沟道宽度, L 为沟道长度),那么器件的跨导不变,从而其热噪声不变。运算放大器的热噪声主要由第一级的晶体管M1,M2,M3,M4和第二级的M5,M6产生。总的热噪声等效为

$$\overline{V_m^2} = \overline{V_m^2}|_{1st} + \frac{\overline{V_{no}^2}|_{2nd}}{(A_{v2} \times A_{v1})^2} = 4kT\gamma \left(\frac{1}{g_{m1,2}} + \frac{g_{m3,4}}{g_{m1,2}^2} \right) \times 2 + \frac{4kT\gamma \left(\frac{1}{g_{m6}} + \frac{g_{m7}}{g_{m6}^2} \right)}{[g_{m1} \times (r_{o2} // r_{o4})]^2}, \quad (5)$$

式中 V_n 为噪声电平, A_v 为放大器增益, g_m 为MOS管的跨导, r_o 为MOS管输出电阻, k 为波尔兹曼常数, r 为等效电阻, $g_{m1,2} = \sqrt{2K_p \left(\frac{W}{L} \right)_{m1,2} I_{D1Q}}$ 。 K_p 为PMOS管的导电因子, I_{D1Q} 为MOS管M1的漏电流。由式中可以看见,提高M1,M2的宽长比可以进一步减少噪声,但这是以增加运算放大器的版图面积为代价的。

此外,KTC噪声也是读出电路的主要噪声来源,在电路中主要通过相关双采样的方法进行抑制。双路采样电路中的一路用来采集复位脉冲过去之后至信号电荷到来之前某一时刻的电平;另一路用来采集像元信号电平,即在采样要结束时的电平;然后将两次采集的电平进行差分比较,就得到了实际的信号电平,两次取样的时间间隔越小,则两次采样间的KTC噪声的相关性越大,CDS方法抑制噪声的效果越明显^[13]。

由热释电探测器的探测原理的分析,可知热释电探测器因为表面温度的变化而产生电流,而温度的变化不同,即温度的升高和降低,则产生的电流方向也不同,所以采样电路开关若只采用常规的PMOS或NMOS开关管,则因为积分电流方向的改变而会带来阈值电压的损失。如采用PMOS开关,在积分电流为“+”时,输出在低电平范围,不会出现阈值电压的损失;但当积分电流变为“-”时,会出现高电平的阈值损失。设计时使用CMOS采样开关,这样因为PMOS和NMOS的互补,在传输高低电平时都没有阈值电压的损耗,且导通电阻更小。输出级电路则需使用运算放大器单位增益跟随器的接法,来确保输出电压的线性度。

4 电路仿真以及实物电路芯片的测试

用Cadence对上述单元电路组成的8通道读出电路进行仿真,设置参数:帧周期为26ms,运算放大器参考电压为2.5V,偏置电压为3.6V。电路的工作时序图如图5所示,其中clk1和clk2是移位寄存器的控制脉冲,其产生的选通信号宽度和时钟周期相同,即在一个时钟周期内读取一个通道的电压。因此,时钟频率即为读出频率。reset控制积分电容的复位,在reset为高电平时,

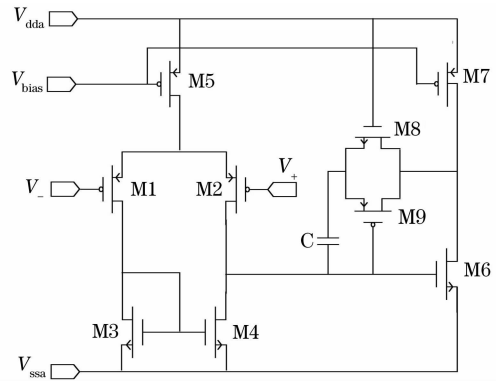


图4 P沟道差分对的两级运算放大器
Fig. 4 Structure of the two-stage operation amplification

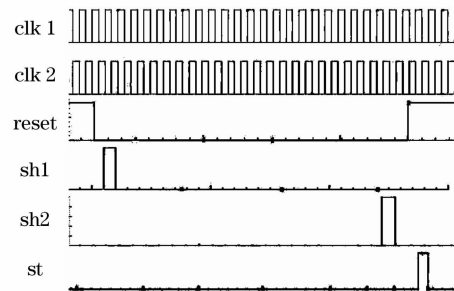


图5 工作时序
Fig. 5 Timing diagram

积分电容被复位到参考电平 V_{ref} 。当 reset 为低电平时, 积分电容开始积分, reset 脉冲的低电平时间大致为积分时间。在 reset 脉冲为低电平期间, 发生两次采样过程, 其中一次发生在 reset 刚变为低电平时, 采样脉冲信号为 sh1(由外部提供); 第二次采样发生在 reset 变为高电平之间, 采样脉冲信号为 sh2, 实际有效积分时间为两次采样脉冲的时间差。st 脉冲出现在积分结束之后, 是一个高电平信号。移位寄存器在 st 信号有效的第一个 clk1 的上升沿产生第一个选通信号, 从而开始读取第一个通道的电压。

图 6 所示, 对单通道电路进行瞬态仿真, 信号输入从 0 到 70 pA 扫描, 步长为 10 pA。可以看出, 积分电容上的放电过程线性度较好。当 i_{dc} 为理论饱和电流大小时, 即 60 pA 在积分时间结束时, 积分电压应当刚好降为零。所以我们对积分电容选取 0.5 pf 还是合理的。

图 7, 8 为 8 通道读出电路一个周期的输出波形, 可见, 随着积分电流的不同, 每个通道最后读出的电压也不同。当电路的输出摆幅在 0~2.07 V 时, 读出电路能正确依次读出所有通道。

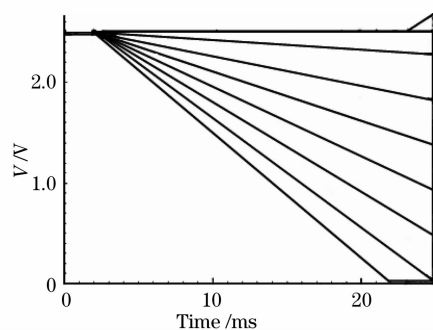


图 6 不同积分电流时, 积分电容上电压的变化

Fig. 6 Discharging process of the integration capacitance with different integration currents

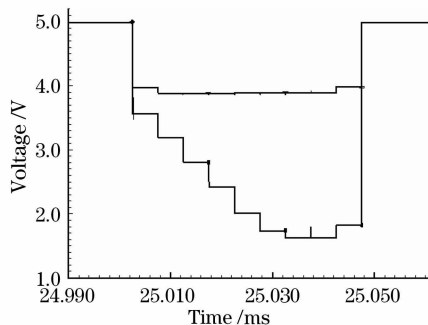


图 7 不同积分电流两路输出波形

Fig. 7 Waveforms of the two output voltages with different integration currents

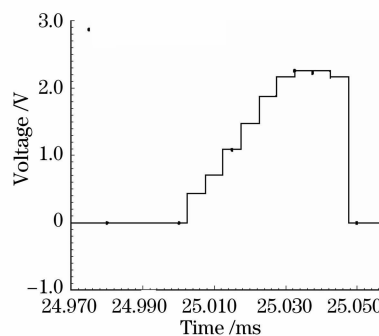


图 8 不同积分电流两路差分输出波形

Fig. 8 Waveforms of the differential output voltages with different integration currents

电路采用了无锡上华 0.5 μm 双铝双多晶硅 CMOS 工艺流片, 流片结束后对得到的晶片经过划片和封装, 进行互连和测试, 以检验所设计电路的功能和性能。用已制备好的弛豫铁电单晶单元型探测器与读出电路的一个通道相连, 用变化的热源对探测器进行照射, 输出信号如图 9 所示。当变化的热辐射照在单元型探测器上时, 和探测器相连的通道输出了信号, 其他通道无输出, 输出的饱和电压为 1.75 V, 考虑到线路连接的损失, 结果与设计仿真的 2.03 V 大致相等, 这说明读出电路芯片可以读取弛豫铁电单晶探测器的信号, 电

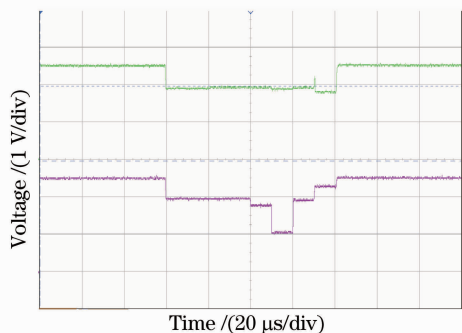


图 9 与单元型探测器连接测试波形

Fig. 9 Waveforms of the output voltage with unit detector

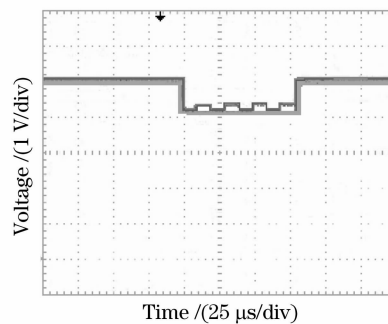


图 10 与光敏芯片耦合后测试结果

Fig. 10 Waveforms of the output voltage with the photosensitive chip

路的设计是可行的。

读出电路芯片与弛豫铁电单晶热释电芯片互连,采用黑体进行辐射,调制频率为 14 Hz,最后测试结果如图 10 所示。当黑体辐射温度为 900 K 时,读出电路输出了调制信号,但是在光照较强时有较大的光响应,要解决这一问题,需要进行设计与工艺的改进,如在版图设计时增加一层光反射层可有效屏蔽。

5 结 论

在弛豫铁电单晶非致冷光传感器的焦平面组件读出电路领域做了新的尝试,提出并实施的 CTIA 输入级读出电路设计方案经过测试是可行的。电路的测试结果表明,在运算放大器偏置电压为 3.6 V,参考电压为 2.5 V,负载电阻为 13 k Ω ,100 kHz 的读出速率时,一路输出电压的平均值为 4.03 V,其不均匀性约 1.3%。电路直流功耗约 10.5 mW。电路与弛豫铁电单晶光敏芯片耦合后,测试能正确读出信号。

参 考 文 献

- 1 Z. Yin, H. Luo, P. Wang *et al.*. Growth, characterization and properties of relaxor ferroelectric PMN-PT single crystals [J]. *Ferroelectrics*, 1999, **229**(1-4): 207~216
- 2 Paul W. Kruse. Uncooled Thermal Imaging, Arrays and System, and Applications[M]. Washington: SPIE Press, 1997. 1~9
- 3 R. W. Whatmore, A. Patel, N. M. Shorrocks *et al.*. Ferroelectric materials for thermal IR sensors state-of-the-art and perspectives[J]. *Ferroelectrics*, 1990, **104**(1): 269~283
- 4 Tang Yanxue, Zhao Xiangyong, Feng Xiqi *et al.*. Pyroelectric properties of [111]-oriented Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(8): 082901
- 5 Tang Yanxue, Wan Xinming, Zhao Xiangyong *et al.*. Large pyroelectric response in relaxor-based ferroelectric (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPbTiO₃ single crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(8): 084104
- 6 W. Y. Chung, T. P. Sun, Y. L. Chin *et al.*. Design of pyroelectric IR readout circuit based on LiTaO sub(3) detectors [J]. *Proc. IEEE Int. Symp. Circ. Syst.*, 1996, **4**: 225~228
- 7 T. David Binnie, Harald J. Weller. An integrated 16 \times 16 PVDF pyroelectric sensor array[J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2000, **47**(6): 1413~1420
- 8 Norbert Neumann, Hannjo Sänze, Matthias Heinze *et al.*. Pyroelektrische detektoren mit integriertem operationsverstärker für hohe modulationsfrequenzen[J]. *Technisches Messen*, 2006, **73**(2): 85~89
- 9 Chih-Cheng Hsieh, Chung-Yu Wu, Tai-Ping Sun. A new cryogenic CMOS readout structure for infrared focal plane array [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1997, **32**(8): 1192~1199
- 10 Xu Yunhua, Zhang Song, Xie Wenqing *et al.*. Input circuit of focal plane arrays[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 555~558
徐运华,张松,谢文青等. 焦平面输入电路研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 555~558
- 11 Li Xue, Tang Hengjing, Wang Yang *et al.*. Study on the dark signal of near-infrared InGaAs linear detector arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 377~381
李雪,唐恒敬,汪洋等. 近红外 InGaAs 线列焦平面组件暗信号研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 377~381
- 12 Zhang Yan, Chu Kaihui, Shao Xiumei *et al.*. GaN-based 512 \times 1 ultraviolet linear focal plane arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3515~3518
张燕,储开慧,邵秀梅等. GaN 基 512 \times 1 元紫外长线列焦平面探测器组件[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3515~3518
- 13 Fang Jun, Li Yanjin, Chen Xinyu *et al.*. The experimental comparison of several correlated sampling methods in linear IR FPA [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 1999, **18**(1): 41~44
房骏,李言谨,陈新禹等. 线列红外焦平面中几种相关采样法分析[J]. *红外与毫米波学报*, 1999, **18**(1): 41~44