

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0097 - 05

非制冷微悬臂梁式红外焦平面探测器 读出电路设计

曹君敏, 陈中建*, 鲁文高, 张雅聪, 雷科, 赵宝瑛
(北京大学微电子学系, 微电子器件与电路教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 针对非制冷微悬臂梁电容式红外探测器, 设计了一款焦平面读出电路. 根据电路噪声建模与分析, 对电路进行了优化设计以抑制噪声. 采用 $0.35\mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺设计, 制造了 16×16 读出电路原型. 测试结果表明, 5V 电源电压、 50Hz 帧频下电路总功耗为 16.5mW , 典型工作模式下线性度为 99.2% , 通道一致性大于 97% , 等效输入噪声电荷小于 150e .

关键词: 非制冷; 红外焦平面阵列; 微悬臂梁; 读出电路
中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

DESIGN OF READOUT INTEGRATED CIRCUIT FOR UNCOOLED INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS BASED ON MICROCANTILEVER

CAO Jun-Min, CHEN Zhong-Jian*, LU Wen-Gao, ZHANG Ya-Cong, LEI Ke, ZHAO Bao-Ying
(Key Laboratory of Microelectronic Devices and Circuits, Department of Microelectronics,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A readout integrated circuit (ROIC) of focal plane arrays for uncooled infrared detectors based on microcantilever was designed. The ROIC was optimized to reduce noise based on noise modeling and analysis. A prototype of 16×16 ROIC was designed and fabricated by $0.35\mu\text{m}$ CMOS technology. The measurement results show that the power dissipation is 16.5mW for a 5V supply voltage at 50Hz frame rate, the linearity is 99.2% at typical modes, the uniformity is larger than 97% and the equivalent noise charge (NEC) is below 150e .

Key words: uncooled; infrared focal plane array (RFPA); microcantilever; readout integrated circuit (ROIC)

引言

非制冷红外焦平面探测器在室温下工作, 具有低成本、低功耗、小型化和高可靠性等优点, 被广泛应用于军事和民用领域^[1~6]. 但是传统的基于氧化钒、非晶硅等材料的电阻型非制冷红外探测器由于响应速度慢、电阻温度系数低、灵敏度低、噪声等效温差 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) 较高 ($\sim 100\text{mK}$) 等缺点限制了其进一步应用. 近年来随着 MEMS 技术的发展, 出现了一种基于双材料微悬臂梁的可变电容型红外探测器技术. 它具有灵敏度高、噪声低、温度系数高等优点, 其 NETD

潜在可达 1mK , 与制冷型探测器的性能接近, 并且其加工工艺完全与标准的硅工艺兼容^[2~6]. 目前, 微悬臂梁红外焦平面探测器已经成为非制冷红外探测器的一个新的研究方向, 其信号读出方式主要有光学读出和电容读出两种^[3~5]. 2006 年美国 Oak Ridge 国家实验室报道了 256×256 的微悬臂梁红外焦平面探测器并采用光学读出实现成像^[3]. 2007 年 Multispectral Imaging 报道了电容读出的 160×120 的红外焦平面探测器^[4,5]. 国内对基于微悬臂梁的非制冷红外焦平面探测技术的研究尚处于起步阶段^[6,7], 主要采用光学读出方式成像. 光学读出方式无需电学连接, 噪声小, 但需要复杂的光学设备. 电

收稿日期: 2009 - 03 - 20, 修回日期: 2009 - 10 - 13

基金项目: 国家 863 高技术研究资助项目 (2009AA04Z316)

作者简介: 曹君敏 (1982-), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 主要研究方向为红外焦平面读出电路设计.

* 通讯作者: E-mail: chenzy@pku.edu.cn

Received date: 2009 - 03 - 20, revised date: 2009 - 10 - 13

容读出方式体积小,利于集成,但所需的读出电路会引入电学噪声.

读出电路是红外焦平面组件的重要组成部分^[8],设计低噪声的读出电路是提高微悬臂梁红外热像仪成像质量的关键,但是目前微悬臂梁红外焦平面读出电路的研究文献还很少^[4-6].本文介绍了一种基于电容读出方式的低噪声微悬臂梁红外焦平面读出电路设计,并分析了电路中噪声源的影响,最后通过流片验证了电路性能.

1 微悬臂梁探测器原理

微悬臂梁结构主要由红外吸收区、双材料区和热绝缘支撑臂三部分构成^[2-6].红外吸收区将吸收的红外辐射转换为热量,同时它与衬底上的金属层形成了一个电容结构 C_s .红外吸收区吸收的热量使双材料区的温度上升产生形变,从而导致电容 C_s 的值发生变化,它与衬底上集成的固定电容 C_r 共同构成了探测器的电容单元,两个电容的公共极板连接到读出电路以检测出电容 C_s 的变化.热绝缘臂起到支撑微悬臂梁的作用,并阻隔红外吸收区与读出电路间的热传导.图 1(a)是单个微悬臂梁的结构示意图,(b)是北京大学 MEMS实验室制备的微悬臂梁红外焦平面探测器阵列照片.

2 读出电路的设计

图 2是微悬臂梁红外焦平面读出电路的整体框架图,主要由像素阵列、行选控制、列选控制、列放大级和输出缓冲器构成.整个电路针对 160 ×120阵列规模、50Hz的帧频设计,像素尺寸 50 ×50 μm^2 ,采用逐行扫描、逐行读出的行波工作模式.单个像元的具体读出电路如图 3(a)所示.该电路采用电容式读出方式.可变的微悬臂梁电容 C_s 和固定参考电容 C_r 的值都非常小 (~15fF),与寄生电容的大小相当,为了降低寄生电容的影响,使用容性跨阻放大器 (Capacitive Transimpedance Amplifier, CTA)作为前级放

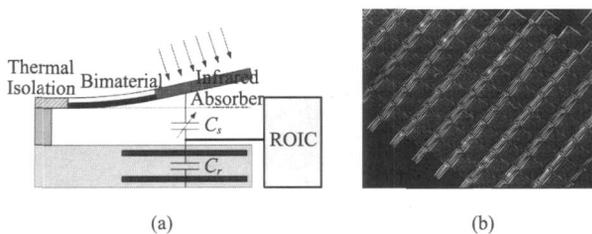


图 1 (a)微悬臂梁结构 (b)微悬臂梁红外焦平面阵列
Fig 1 (a)Microcantilever structure (b)microcantilever RFPA

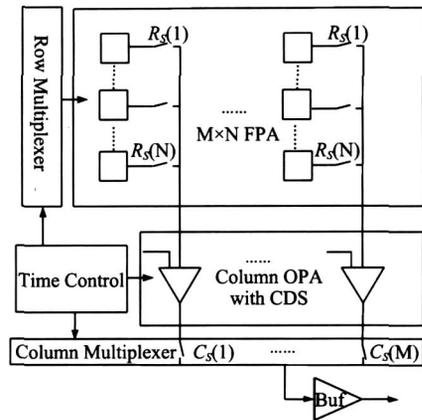


图 2 微悬臂梁读出电路框图
Fig 2 Block diagram of microcantilever ROIC

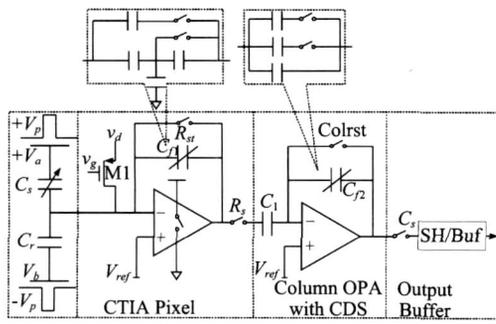
大.读出电路工作时,在传感电容的两端加上相位相反、幅度相等的脉冲电压.当有红外辐射时, C_s 发生改变,在 CTA 的输出端会产生一个与 C_s 变化量成比例的电压信号,这个输出电压经过带相关双采样 (CDS) 的列放大级放大后由缓冲器输出.输出电压的表达式为:

$$V_{out} = \frac{V_p \times (C_r - C_s)}{C_{\beta}} \times G_c \quad (1)$$

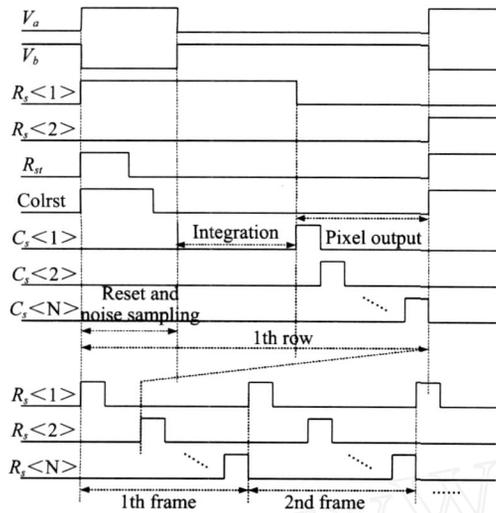
其中, V_p 为电容两端所加脉冲信号的幅度, G_c 是列放大器的增益.

图 3(b)所示是读出电路工作时序图.其读出操作主要分为三个部分:首先是复位和噪声采样阶段,此时第一行行选 $R_s <1>$ 信号选通, R_s 和 Colrst 闭合对 CTA 和列放大器复位,同时对传感器电容进行充电,然后 R_s 断开,这时也是 CDS 电容 C_1 采样低频 $1/f$ 噪声、反馈电容 kT/C 噪声、运放失调和开关电荷注入的过程;随后进入积分阶段, Colrst 断开,传感器电容上的脉冲电压 V_a 和 V_b 改变方向,与电容差值成比例的电荷在 CTA 电容 C_{β} 上积分转变为电压信号,这个电压信号减去 CDS 电容 C_1 上的误差电压并放大得到正确的输出,然后行选信号断开,输出电压被保存在采样保持输出缓冲器中;最后是像素输出阶段,在列选信号 C_s 的控制下,一行中的每一列数据依次读出,直到最后一列.

当所有行输出完毕时,得到一帧完整的信号.为了降低系统功耗,当行选信号断开时,该行像素的 CTA 也同时关断.并且为了适应不同的传感器电容变化幅度,像素单元的增益可以通过调整反馈电容的大小来调节,相应的列放大器也有几组不同的放大倍数.



(a)



(b)

图 3 (a)读出电路结构 (b)工作时序
Fig 3 (a) Schematic diagram of ROIC (b) operation timing

3 噪声分析

微悬臂梁红外焦平面组件的噪声主要是探测器的机械噪声和读出电路的电学噪声^[4,5]。电路中的噪声源分布如图 4所示。

因为基于微悬臂梁的传感器是电机械器件,在传感器的工作过程中,静电力的作用会使微悬臂梁发生振动,给输出信号带来了噪声。为了避免这种机械振动噪声的影响,可以在传感器中间极板上串联一个大电阻,以阻尼微悬臂梁的振动。如图 3(a)中用一个 MOS管 M1作为阻尼电阻,但是这个 MOS管寄生的 PN结又会引入散粒噪声。

电学噪声主要是前级 CTIA 的噪声,包括了 CTIA 的 1/f 噪声、热噪声以及反馈电容的 kT/C 噪声。由于在列放大级中采用了 CDS 技术,电路中的低频噪声如 1/f 噪声、运放的失调、反馈电容的 kT/C 噪声能大幅度减小^[1],因此可以主要考虑运放的热噪声对电路噪声性能的影响。

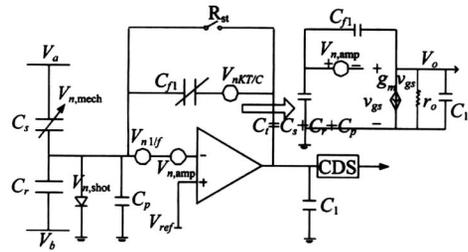


图 4 微悬臂梁读出电路噪声源与小信号模型
Fig 4 Noise source and small-signal model of microcantilever ROIC

为了明确运放热噪声对系统噪声的影响,可以简单地以图 4所示的单极点运放小信号模型为例,求出读出电路的输入等效热噪声电荷 (equivalent noise charge, ENC)。假如运放的等效输入噪声电压为 $V_{n,amp}$,则系统传输函数为:

$$\frac{V_o}{V_{n,amp}} = \frac{g_m}{\frac{1}{r_0} + g_m \frac{C_{f1}}{C_{f1} + C_i} + \left(\frac{C_f C_{f1} + C_f C_i + C_{f1} C_i}{C_{f1} + C_i} \right) s} \quad (2)$$

其中, C_p 是运放输入端寄生电容, C_i 是 CTIA 输出端的负载电容, $C_t = C_s + C_r + C_p$ 是输入端的总电容。

运放输入端的等效热噪声频谱为:

$$V_{n,amp}^2 = \frac{16kT}{3g_m} (1 + g_{m1}/g_m) = \frac{kT}{g_m} \quad (3)$$

其中 g_{m1} 是运放负载管的跨导,取 $g_{m1} = 16(1 + g_{m1}/g_m)/3$ 。

在整个频域范围内对噪声频谱求和,可得到总的输出噪声功率为:

$$V_o^2 = \frac{kT}{4} \left(\frac{(C_{f1} + C_i)^2}{C_{f1} (C_f C_{f1} + C_f C_i + C_{f1} C_i)} \right) \quad (4)$$

也就是说 CTIA 等效的输入噪声电荷是:

$$ENC_{amp} = \left(\frac{kT}{4e^2} \left(\frac{C_{f1} (C_{f1} + C_i)^2}{(C_f C_{f1} + C_f C_i + C_{f1} C_i)} \right) \right)^{1/2} \quad (5)$$

从上式可以看出,要减少等效噪声电荷,可以增大负载电容 C_i ,但是这会使得电路的带宽变小;也可以减小反馈电容 C_{f1} 和寄生电容 C_p ,但是反馈电容的减小会使像素间的电容失配变大,一致性减小。另一个办法是减小运放负载管的跨导或增大输入管的跨导使运放的等效输入噪声谱减小。在实际设计中,可以在满足电路帧频的要求下选取较大的 CDS 电容以增大负载电容 C_i ;反馈电容 C_{f1} 的取值则必须在电路噪声和像素一致性之间进行折衷,本设计中 C_{f1} 有 5fF、10fF、20fF 三组可选值,可通过开关调节以研究反馈电容 C_{f1} 对电路性能的影响。

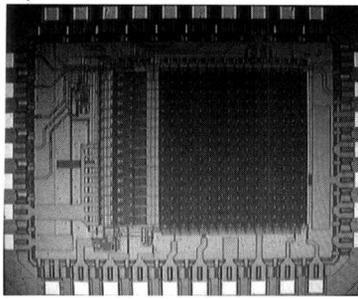


图5 读出电路芯片显微照片
Fig.5 Chip photomicrograph of ROIC

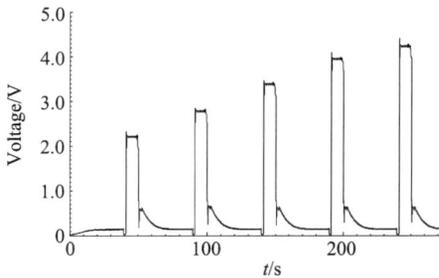


图6 后仿真输出电压 ($C_f = 10\text{fF}$)
Fig.6 Output voltage of post-simulation ($C_f = 10\text{fF}$)

4 测试结果

采用 $0.35\mu\text{m}$ N阱 2P4M CMOS工艺设计了一个 16×16 的红外焦平面探测器读出电路,像素尺寸为 $50 \times 50\mu\text{m}^2$.芯片照片如图5所示.

电路工作在5伏电源电压下,帧频为50Hz(针对 160×120 规模而言),电路的总功耗为16.5mW,其中75%以上的功耗由输出缓冲器消耗,像素阵列和列放大级的功耗仅为4mW.

(1) 线性度测量

为了模拟微悬臂梁电容的变化,测试时可以在每个周期改变施加在传感器电容上的脉冲信号的幅度.在反馈电容 C_f 为10fF的典型工作模式下,每次脉冲电压改变幅度为20mV时,输出电压的后仿真波形如图6所示.对输出电压做线性拟合,可以得到如图7所示的曲线图,虚线和实线分别是仿真和测试结果,可以看到实际的电路增益略小于仿真的结果,这是因为寄生电容的影响使得实际的反馈电容大于设计值,从而使增益减小.在 $C_f = 10\text{fF}$ 的典型工作模式下,测试得到的线性度为99.2%.

(2) 一致性与噪声测量

对于相同的微悬臂梁电容变化量,由于工艺造成的元件失配等原因,各像素的输出电压不一致,从而会产生固定图案噪声.图8为相同电压输入下,电路的输出波形,每一个方波里是一行的16列输出

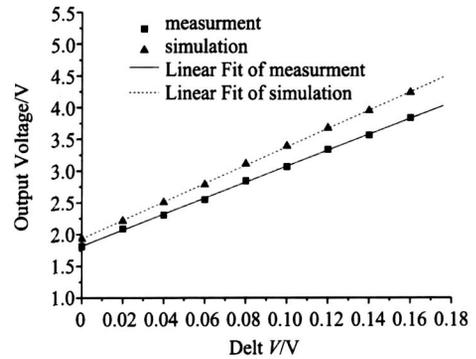


图7 输出电压线性拟合曲线 ($C_f = 10\text{fF}$)
Fig.7 Linear fitted curve of output voltage ($C_f = 10\text{fF}$)

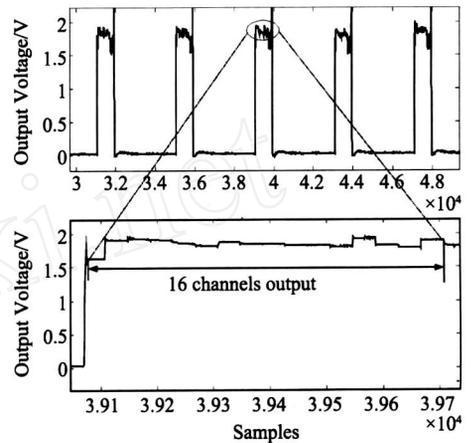


图8 输出电压波形
Fig.8 Output waveform

值,可以看到实际输出波形中,列与列之间的值存在着不一致性.

实际测试中,可以在相等的电压输入下,采集多帧输出数据,利用式(6)计算像素的不一致性:

$$U = \frac{1}{P} \left[\frac{1}{M \times N - 1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (P_{ij} - \bar{P})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

CTA反馈电容 C_f 的失配是造成像素间不一致性的一个重要因素, C_f 越大,电容匹配度越高,一致性越好.从图9可以看到一致性在不同 C_f 下随输入电压变化量的关系,电压变化量增大时,一致性也有缓慢的增加.测试结果表明整个电路的一致性大于97%.

在相同输入下,针对特定的像素点采集多帧数据,根据以下公式可以得到电路的等效噪声电荷

$$\text{ENC} = \frac{\left[\frac{1}{f - 1} \sum_{k=1}^f (P_k(i, j) - \bar{P}(i, j))^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{G} \quad (7)$$

其中, f 为采集的帧数, G 为输入电荷到输出电压的

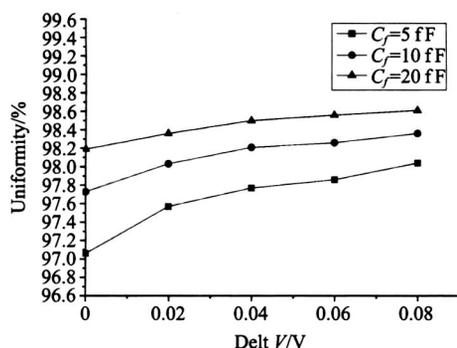


图9 一致性与输入电压变化量关系

Fig 9 Uniformity vs input voltage variation

表1 读出电路参数

Table 1 Parameters of RO IC

工艺	0.35 μ m DG 2P4M
像素尺寸	50 \times 50 μ m ²
芯片面积	2.1 \times 1.6mm ²
电源电压	5V
最大输出摆幅	3V
帧频	50Hz
线性度	99.2% (C _f = 10fF时)
一致性	>97%
等效噪声电荷 (ENC)	<150e
功耗	16.5mW

转换增益. 根据测量结果可以得到,在反馈电容为 5fF、10fF、20fF时的等效噪声电荷分别为 113e、116e 和 137e. 可以看到随着反馈电容的减小,等效噪声电荷 ENC 也会随之减小,与前面的噪声分析得到的结果一致. 但是在反馈电容减小到一定程度时,热噪声所占比例降低,继续减小 C_f 对噪声的影响不明显. 表 1 总结了该读出电路的参数.

5 结论

设计了一种基于微悬臂梁电容单元的红外

焦平面读出电路,噪声分析表明该电路能有效抑制 $1/f$ 噪声、 kT/C 噪声等低频噪声分量. 测试结果表明电路功能正确,线性度良好,噪声与一致性具有进一步优化的潜力.

致谢 感谢北京大学微电子所叶红飞工程师对芯片测试提供的帮助.

REFERENCES

- [1] CHEN Xi-Qu, YI Xin-Jian, WANG Qiang Low-noise read-out circuit of VO₂-based uncooled focal plane array[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈西曲, 易新建, 王强. 具有低噪读出特性的 VO₂非制冷焦平面读出电路. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(4): 246—250.
- [2] Amantea R, Knoedler C M, Pantuso F P, et al An Uncooled IR Imager with 5mK NEID [J]. *SPIE*, 1997, 3061: 210—222.
- [3] Lavrik N V. Uncooled infrared imaging using biomaterial microcantilever arrays[J]. *SPIE*, 2006, 6206 (1K): 1—8.
- [4] Hunter S R, Gregory S, Maurer G, et al High sensitivity 25 μ m and 50 μ m pitch microcantilever IR imaging arrays [J]. *SPIE*, 2007, 6542 (1F): 1—13.
- [5] Hunter S R, Maurer G S, Simelgor G, et al Development and optimization of microcantilever based IR imaging arrays [J]. *SPIE*, 2008, 6940 (13): 1—12.
- [6] LU Hai-Tao, CHEN Yong-Ping, LIANG Ping-Zhi Design and fabrication of microcantilever uncooled infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘海涛, 陈永平, 梁平治. 微悬臂梁非制冷红外探测器的研制. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 46—49.
- [7] Yu X M, Yi Y L, Ma S L, et al Design and fabrication of a high sensitivity focal plane array for uncooled IR imaging [J]. *J. Micromech Microeng*, 2008, 18(5): 057001.
- [8] CHEN Zhong-Jian, LU Wen-Gao, TANG Ju, et al Study on test method of TDI function for infrared focal plane array CMOS readout circuits[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈中建, 鲁文高, 唐炬等. 红外焦平面 CMOS读出电路 TDI 功能的测试方法研究. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(5): 342—345.