光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240919001

超高行频高灵敏度短波红外焦平面读出电路研究

景　松[1,2]，黄松垒[1,2*]，李　淘[1,2]，杨睿杰[3]，张镇锋[3]，李　雪[1,2]

（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 200083；2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083；3. 无锡中科德芯感知科技有限公司，无锡 214000）

摘　要： 针对食品色选以及医疗成像的应用，设计了一款适用于短波红外InGaAs焦平面的高行频高灵敏度1 024×1元线列读出电路。读出电路输入级采用CTIA结构，具有较高的注入效率，针对微光、强光等不同应用场景，设计四档积分电容，其中最高增益档积分电容为10 fF。研究单元电路输出级瞬态响应，优化开关管尺寸、设计高带宽运放以减小关键节点时间常数，进而降低输出级运放噪声，提高动态范围。优化读出电路版图电源网络，抑制功耗过高引起的压降问题。经标准CMOS 0.18 μm工艺开展读出电路加工，并与像元中心距12.5 μm光敏芯片匹配耦合，读出电路采用边积分边读出工作模式。结果表明，1 024×1元线列焦平面功耗为118.8 mW，动态范围为71 dB，积分电容为10 fF档位时噪声小于3.13 mV，实现了40 kHz超高行频读出。

关键词： 读出电路；高行频；动态范围；低噪声；电源压降

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0167－05

Ultra-High Line Frequency, High-Sensitivity Short-Wave Infrared Focal Plane Readout Circuit

JING Song[1,2], HUANG Songlei[1,2], LI Tao[1,2], YANG Ruijie[3], ZHANG Zhenfeng[3], LI Xue[1,2]

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 3. Wuxi Zhongke Dexin Optoelectronic Technology Research Institute Co., Ltd, Wuxi 214000, CHN)

Abstract: For the applications of food coloring sorting and medical imaging, a high line frequency and sensitivity 1 024×1-element line column readout circuit was designed for the short-wave infrared InGaAs focal plane. The input stage of the readout circuit adopts a CTIA structure with a high injection efficiency and is designed with four levels of integrated capacitance for different application scenarios, such as low and strong light; the highest gain level of integral capacitance is 10 fF. The transient response of the output stage of the unit circuit is studied, the switch size is optimized, and the high-bandwidth op amp is designed to reduce the time constant of the key node, so as to reduce the noise of the output stage op amp and improve the dynamic range. The readout circuit layout power-supply network was optimized to suppress the voltage drop caused by excessive power consumption. The readout circuit is processed by the standard CMOS 0.18 μm process and is coupled with a photosensitive chip with a pixel center distance of 12.5 μm. The readout circuit adopts the "integral while readout" operation mode. The results show that the power consumption of the 1 024×

收稿日期：2024－09－19.

基金项目：中国科学院青年创新促进会项目(2020245).

*通信作者：黄松垒

1-element line focal plane is 118.8 mW, and the dynamic range is 71 dB. At 10 fF of the integral capacitor, the focal plane noise is less than 3.13 mV, and the ultra-high line frequency readout is 40 kHz.

Key words: readout circuit; high-line-frequency; dynamic range; low noise; I-R drop

0 引言

短波红外线列焦平面探测器广泛应用于食品色选、航天遥感、医疗诊断、材料检测等领域[1-2]。在食品色选应用中,探测器可以高效筛选掉大米中的异色粒、霉变粒、碎米,以及玻璃、杂色塑料等杂质。高行频是决定食品色选效率的关键指标,保证准确筛选出高速运动下的目标。短波红外探测器也应用于医疗诊断中,通常需要1 kHz甚至40 kHz以上高速采集,并且对高行频读出电路有较高要求。

高行频读出电路可以实现高速监测、观察等应用需求[3],有效解决高速成像下目标拖尾等问题。在高行频电路设计过程中,电路带宽受节点电容影响,分析节点寄生电容优化时间常数是设计难点;同时高行频电路功耗必然较大,会导致电源压降过大,电路有功能异常风险;此外,高行频电路还会引起噪声增加。

为实现高行频低噪声读出电路,研究了读出电路单元输出级瞬态响应,通过优化复位开关管尺寸、输出级运放参数以减小信号建立时间,在版图中设计电源网络以抑制电源压降,通过相关双采样结构、滤波电容、优化设计运放以抑制噪声,并设计推挽运放以提高总线输出级带宽。

1 超高行频读出电路设计

针对高行频需求,为了尽可能提高积分时间利用率,同时抑制固定图形噪声和KTC噪声,单元电路采用一种带有相关双采样(CDS)的IWR工作模式电路结构[4-5],如图1所示。电容负反馈跨导放大器(CTIA)模块将光生电流信号积分成电压信号[6-7],再由相关双采样模块采样信号并保持,最后信号传输到总线输出级,完成片外读出。

为满足读出电路40 kHz行频的要求,在帧周期25 μs内需要完成采样1、采样2、积分过程、复位过程。为尽量提高积分时间,采样、复位时间均小于1 μs,各信号间隔时间小于0.5 μs。同时提高各级缓冲运放的带宽,虽然大带宽伴随着高功耗,但针对功耗占比最高的单元输出级运放,通过移位器寄存器模块输入选通控制信号SELUNIT,在输出选通单元电压时开启对应单元输出级运放,在不选通时关闭,可以极大降低电路瞬时功耗。大带宽也会引起噪声问题,在输出级添加滤波电容C_1以抑制热噪声,由于C_1会限制节点带宽,折中考虑取0.5 pF;增加缓冲级运放输入管宽长比同时减小电流源管宽长比,以减小运放热噪声;相关双采样电路还可以有效抑制KTC噪声和固定图形噪声。

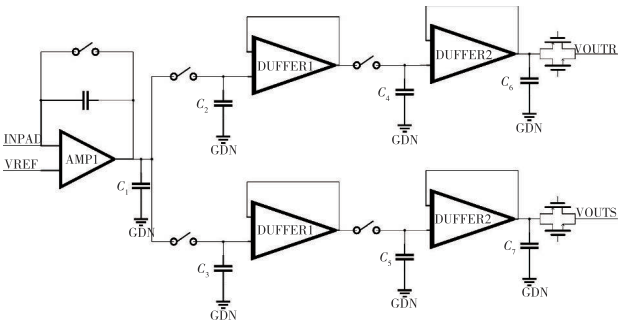

图1 单元读出电路

1 024×1元线列读出电路中心距为12.5 μm,包括1 024位有效像元,8位冗余像元,共4路输出,每256个单元输出级V_{OUT}并联在一起,由SELUNIT信号依次选通开关管控制输出,如图2所示。

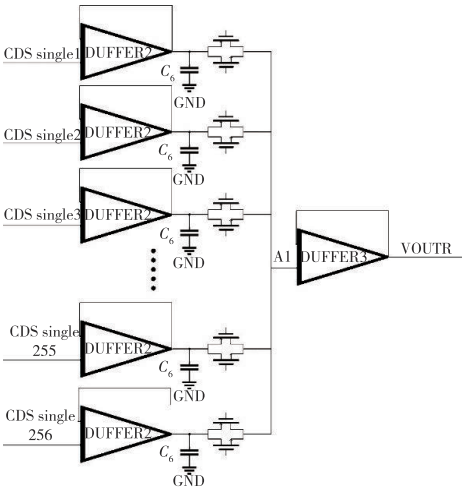

图2 256元输出级电路并联

对于单元输出级节点A1,断开状态的MOS管对存在寄生电容和寄生电阻,选通的单元MOS管

对与其余断开的255个MOS管对（共510个MOS管）形成RC回路，大大限制了节点带宽，是超高行频读出电路的设计瓶颈，等效RC电路如图3所示。

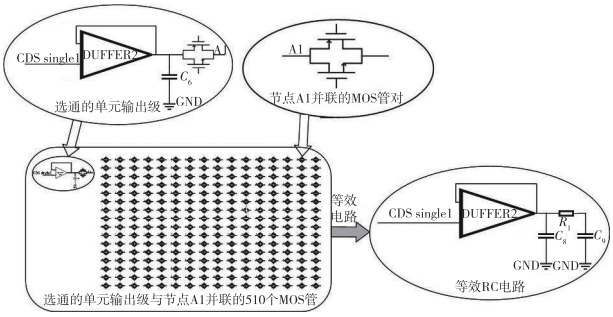

图3　单元输出级节点等效RC电路

图中C_8为1 pF滤波电容，C_9为510个并联的MOS断开时总寄生电容，其计算式为：

$$C_9=255(C_{NMOS}+C_{PMOS})=255C_{OV}(W_N+W_P) \tag{1}$$

式中，C_{OV}为每单位宽度的交叠电容，W为MOS管栅宽。图3中MOS管对的导通电阻R_{MOS}可表示为：

$$R_{MOS}=R_nR_p/(R_n+R_p) \tag{2}$$

$$R_n=\frac{1}{\mu_nC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_n(V_{GSN}-V_{THN})} \tag{3}$$

$$R_p=\frac{1}{\mu_pC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_p(V_{GSP}-V_{THP})} \tag{4}$$

得到单元输出级节点A1时间常数τ：

$$\tau=\frac{\mu_nC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_n(V_{GSN}-V_{THN})+\mu_pC_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_p(V_{GSP}-V_{THP})}{255C_{OV}(W_N+W_P)} \tag{5}$$

考虑电子迁移率为空穴迁移率的两倍，在MOS管对设计中，PMOS宽长比取值为NMOS宽长比的两倍；考虑版图匹配性，L_n，L_p均取1 μm。通过仿真分析MOS管对在不同W_n，W_p值时输出节点A1的瞬态响应，得到最优解W_n=4 μm，W_p=8 μm，此时系统响应最快、时间常数最小。对输出节点电容值拟合，得到节点A1负载电容值约3 pF。在多工艺角下仿真节点A1的瞬态响应，给单元缓冲运放输入10 MHz方波，结果如图4所示，信号响应满足输出级带宽指标要求。

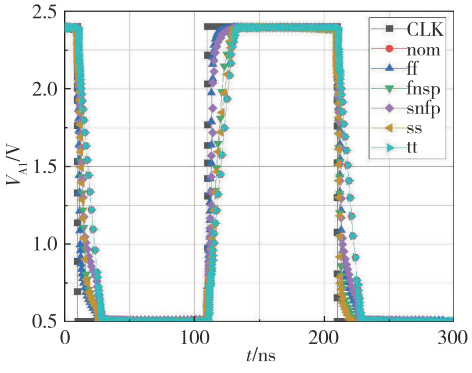

图4　多工艺角下仿真节点A1的瞬态响应

读出电路注入电荷数N_{in}与积分电压V_O关系如公式（6），读出电路增益与积分电容成反比，读出电路满阱容量与积分电容成正比，如公式（7）。折中考虑，CTIA模块积分电容最小值取10 fF，V_{REF}为CITA偏置电压：

$$V_O=V_{REF}-\frac{N_{in}e}{C_{int}} \tag{6}$$

$$\frac{\partial V_O}{\partial N_{in}}=-\frac{e}{C_{int}} \tag{7}$$

2　超高带宽低噪声输出级运放设计

读出电路的单元信号由总线输出级依次传输到片外。总线输出级运放工作频率高、负载电容大，为实现读出电路超高行频设计，采用推挽式运放，电路结构如图5所示。M1，M2，M3，M4管为第一级运放，M6，M7，M8，M9管为第二级运放，其中M1，M2管为驱动管，运放工作时有两条小信号通路，提高运放带宽，适用1 024×1元高行频需求。运放采用PMOS输入管以减小电流源管1/f噪声[8-10]，通过增加M1管宽长比、减小M3管宽长比以减小热噪声。

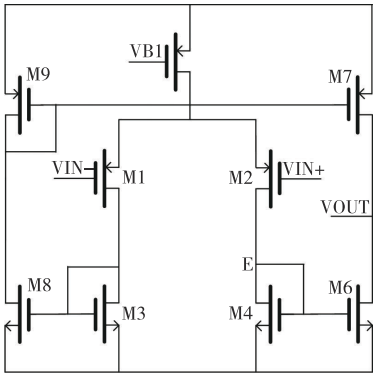

图5　推挽式总线输出级运放电路

经过仿真，当负载为 15 pF 时，运放功耗为 4.87 mW、增益为 35 dB、带宽为 110 MHz、相位裕度为 55°，满足稳定性要求，如图 6 所示。运放输入 15 MHz 理想方波 V_{IN}，输出信号 V_{OUT} 建立正常，摆率 120 V/μs，如图 7 所示。

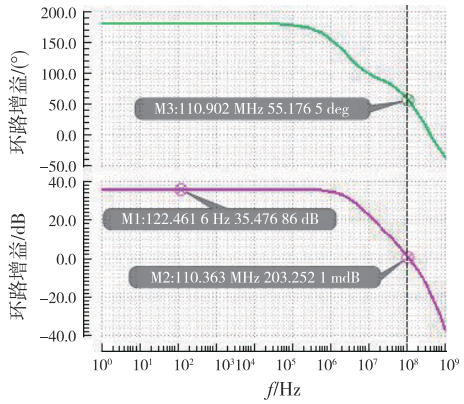

图 6 运放增益带宽仿真结果

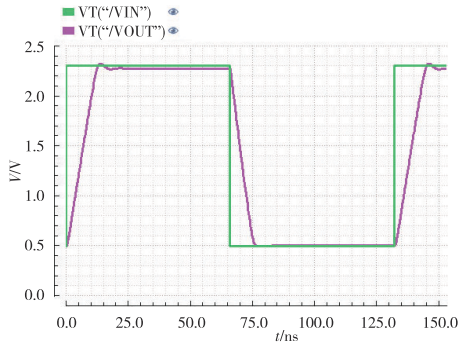

图 7 运放摆率仿真

3 读出电路版图与测试成像

短波红外 InGaAs 1 024×1 元线列焦平面读出电路版图如图 8 所示。高行频读出电路伴随着高功耗，大电流会导致电源金属走线压降过大[11]，电路有功能异常的风险，采用 M5，M6 层金属绘制电源网络以减小金属走线电阻。电路经标准 CMOS 0.18 μm 工艺加工，电路芯片与 InGaAs 光敏芯片倒焊互连后焦平面如图 9 所示。经过测试，焦平面平均输出电压随积分时间的变化如图 10 所示，线性度良好，回归系数 R=0.999 76。

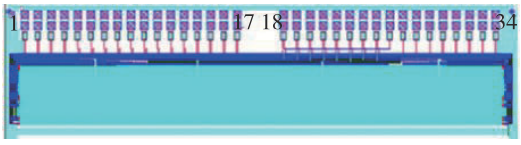

图 8 读出电路版图

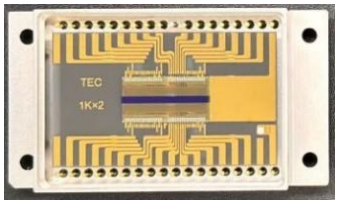

图 9 短波红外 InGaAs 1 024×1 元线列焦平面

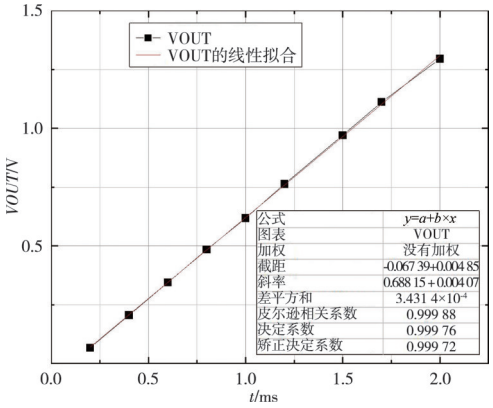

图 10 焦平面平均输出电压线性度测试

取焦平面各像元多次采样的输出电压，计算其均方根误差作为该像元的输出噪声电压。当积分电容为 10 fF 档位时，焦平面平均噪声电压为 3.13 mV，1 024×1 元线列焦平面噪声电压如图 11。

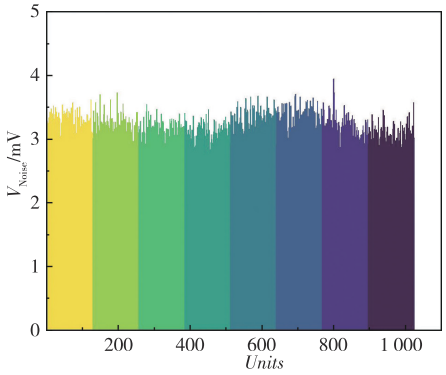

图 11 1 024×1 元线列焦平面噪声电压

1 024×1 元线列焦平面噪声电压在 40 kHz 行频下，1 024×1 线列焦平面对传送带图像由左至右线扫成像如图 12，成像清晰，数字可分辨。

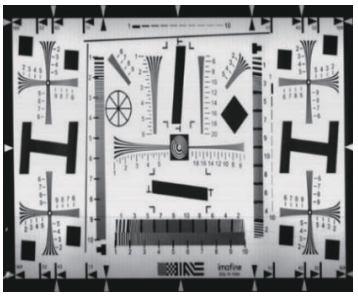

图 12 1 024×1 元线列焦平面高行频下对分辨率的卡成像

经过测试，读出电路性能如表1所示。

表1　读出电路性能指标

参数	测试值
像元中心距/μm	12.5
动态范围/dB	71
单元读出速率/MHz	15
行频/kHz	40
线性输出范围/V	0～1.8
线性度/%	99
读出电路噪声	3.13 mV@10 fF
功耗/mW	118.8

4　结论

本文设计了一款InGaAs短波红外焦平面用的超高行频高灵敏度读出电路。分析并优化单元输出级开关尺寸，减小输出级节点时间常数；采用M5，M6层金属绘制电源网络以抑制高功耗引起的电源压降；采用相关双采样电路抑制固定图形噪声和KTC噪声，优化设计各级运放输入管、电流镜管以抑制运放热噪声；设计高带宽低噪声推挽式总线运放，能够驱动15 pF负载，带宽达110 MHz。电路经标准CMOS 0.18 μm工艺加工流片，与光敏芯片耦合后成像清晰，读出电路噪声小于3.13 mV@10 fF，动态范围大于71 dB，行频大于40 kHz。

参考文献：

[1] Macdougal M, Hood A, Geske J, et al. InGaAs focal plane arrays for low-light-level SWIR imaging [J]. Proc. SPIE, 2011, 8012: 801221.

[2] Yuan H, Andresen B F, Fulop G F, et al. FPA development: From InGaAs, InSb, to HgCdTe [J]. Proc. SPIE, 2008, 6940: 69403C.

[3] 白丕绩，姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. 红外技术，2015，37(2)：89-96.
Bai Piji, Yao Libin. Third-generation infrared focal plane detector readout circuit [J]. Infrared Technology, 2015, 37(2): 89-96.

[4] 黄张成，黄松垒，张　伟，等. 边积分边读出低噪声红外焦平面读出电路研究[J]. 红外与毫米波学报，2011，30(4)：297-300，304.
Huang Zhangcheng, Huang Songlei, Zhang Wei, et al. Low noise readout circuit for infrared focal plane arrey in integration while read [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(4): 297-300, 304.

[5] Back W A, Anderson J R. Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent hall technique [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 62(2): 514-545.

[6] 姜俊伟，赵毅强，孟范忠，等. 天津大学电子信息工程学院专用集成电路设计中心[J]. 红外与激光工程，2009，38(5)：788-791.
Jiang Junwei, Zhao Yiqiang, Meng Fanzhong, et al. High performance readout integrated circuit for IR detectors [J] Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 788-791.

[7] 李毅强，刘昌举，祝晓笑. 640×512焦平面读出电路设计[J]. 半导体光电，2014，35(5)：777-780.
Li Yiqiang, Liu Changju, Zhu Xiaoxiao. 640×512 focal plane array readout circuit design [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 777-780.

[8] 王　攀，丁瑞军，叶振华. 短波红外焦平面弱信号读出的高帧频模拟链路设计[J]. 红外与激光工程，2014，43(5)：1371-1374.
Wang Pan, Ding Ruijun, Ye Zhenhua. High frequency weak signal analog chain design of short-wavelength IRFPAs [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1371-1374.

[9] 黄松垒，张　伟，黄张成，等. 大周长面积比延伸波长InGaAs红外焦平面噪声[J]. 红外与毫米波学报，2012，31(3)：236-238.
Huang Songlei, Zhang Wei, Huang Zhangcheng, et al. The noise of the extended wavelength InGaAs FPA with large perimeter-area-ratio [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(3): 236-238.

[10] Vermeiren J, Van Bogget U, Van Horebeek G. Low-noise, fast frame-rate InGaAs 320×256 FPA for hyperspectral applications[J]. Proc. SPIE, 2009, 7298: 72983N.

[11] 徐　星，陈永平，陈世军，等. 长线列CMOS图像传感器的性能优化设计[J]. 半导体光电，2021，42(1)：53-55.
Xu Xing, Chen Yongping, Chen Shijun, et al. Performance optimization of long linear array CMOS imge sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 53-55.

作者简介：

景　松(1994—)，男，硕士，工程师，主要研究领域为短波红外焦平面用读出电路设计；

黄松垒(1984—)，男，博士，副研究员，主要从事光电传感器读出电路设计。