

非制冷红外探测器读出电路的非均匀性研究

袁红辉 陈永平

Non-uniformity study on readout circuit for uncooled IR detector

Yuan Hong-Hui Chen Yong-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 118503 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.118503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.118503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分数阶并联 $RL_\alpha C_\beta$ 电路

Fractional-order multiple $RL_\alpha C_\beta$ circuit

物理学报.2014, 63(3): 038401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.038401>

荷控忆阻器等效电路分析模型及其电路特性研究

Equivalent circuit analysis model of charge-controlled memristor and its circuit characteristics

物理学报.2013, 62(21): 218401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.218401>

恒定温度应力加速实验失效机理一致性快速判别方法

Rapid identification of the consistency of failure mechanism for constant temperature stress accelerated testing

物理学报.2013, 62(6): 068502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.068502>

SOI SONOS EEPROM 总剂量辐照阈值退化机理研究

Threshold voltage degradation mechanism of SOI SONOS EEPROM under total-dose irradiation

物理学报.2011, 60(9): 098502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.098502>

基于 SOI 技术的单层多晶 EEPROM 和 SONOS EEPROM 抗总剂量辐照特性研究

Total dose characteristics of single poly EEPROM and SONOS EEPROM on SOI

物理学报.2011, 60(2): 028502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.028502>

非制冷红外探测器读出电路的非均匀性研究*

袁红辉† 陈永平

(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)

(2014年10月2日收到; 2015年1月11日收到修改稿)

对于长线列的非制冷红外探测器组件, 不同探测元之间的非均匀性是衡量电路设计的关键指标. 为了实现长线列非制冷红外探测器的高性能读出, 本文设计了一种基于电流镜方式的非制冷红外探测器160线列读出电路, 电路由电流镜输入模块、电容负反馈互导放大器模块及相关双采样输出模块组成. 电路采用 $0.5\ \mu\text{m}$ 工艺制作完成. 通过合理设置电路中MOS管的参数和布局电流镜版图, 电路的非均匀性有了明显地改善. 通过测试, 电路的非均匀性小于1%, 器件总功耗约为100 mW, 并具有良好的低噪声特性, 输出噪声小于1 mV, 输出摆幅大于2 V. 该电路与160线列非制冷红外探测器互连后, 能较好地完成红外信号的读出, 在积分时间为20 μs 的情况下, 器件的响应为0.294 mV/ Ω , 整体性能良好. 该电路的研制对超长线列的非制冷红外冷探测器读出电路研制奠定了重要的技术基础.

关键词: 电流镜方式, 非制冷探测器, 非均匀性, 读出电路**PACS:** 85.40.-e, 84.30.Bv, 84.30.Jc**DOI:** 10.7498/aps.64.118503

1 引言

非制冷红外探测技术是今后红外技术发展的一个重要方向^[1], 特别是非制冷技术的发展使红外热摄像技术扩展到诸如工业监控测温、执法缉毒、安全防范、医疗、卫生、海上救援、舰船驾驶员用夜视增强观察仪等广阔的民用领域^[2-8]. 其原理是温度变化引起载流子浓度和迁移率的变化, 从而表现出电阻变化的信号形式, 由此来测量热辐射, 一般采用电流偏置方式, 通过读出非制冷红外探测器两端的电压信号变化, 得出探测器的电阻变化, 从而反映出红外辐射量的不同而成像^[9].

读出电路是非制冷红外探测器组件的重要组成部分, 电路的非均匀性指标是非制冷探测器成像质量的关键因素. 目前国内外已鲜有这方面的研究工作报道, 如文献^[10-14]针对不同的电阻值设计了不同规格的非制冷探测器线列读出电路, 文献^[15-18]设计了面阵的非制冷读出电路, 但这些电路都需要设计与之对应的盲元探测器来设计读

出电路, 增加了非制冷红外探测器工艺的复杂性. 且电路在实际应用中, 其性能参量还有待进一步提高.

本文设计了一种基于电流镜方式的低噪声非制冷红外探测器读出电路, 并分析了影响电路非均匀性的关键因素, 利用增加电流镜地线宽度及电流镜布局在线列电路的左右两端和采用低功耗的跟随管, 有效地提高了电路的非均匀性等指标, 最后通过流片验证了电路各种性能.

2 电路结构设计

线列160非制冷红外探测器电路的总体电路设计如图1所示, 包括电流镜方式产生的电流 $I_{in1}-I_{in160}$, 差分放大器的CTIA模块, 相关双采样(CDS)模块, 电路输出部分及160位移位寄存器模块等. 在常温下, 非制冷红外探测器的电阻为一固定值, 约为50 k Ω , 当其吸收红外辐射后, 其电阻变小, 在探测器偏置电压固定的情况下, 流过探测器的电流会增加, 而电流镜的电流值为一固定值,

* 中国科学院预研支撑项目(批准号: 61501060305)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuanhonghui@163.com

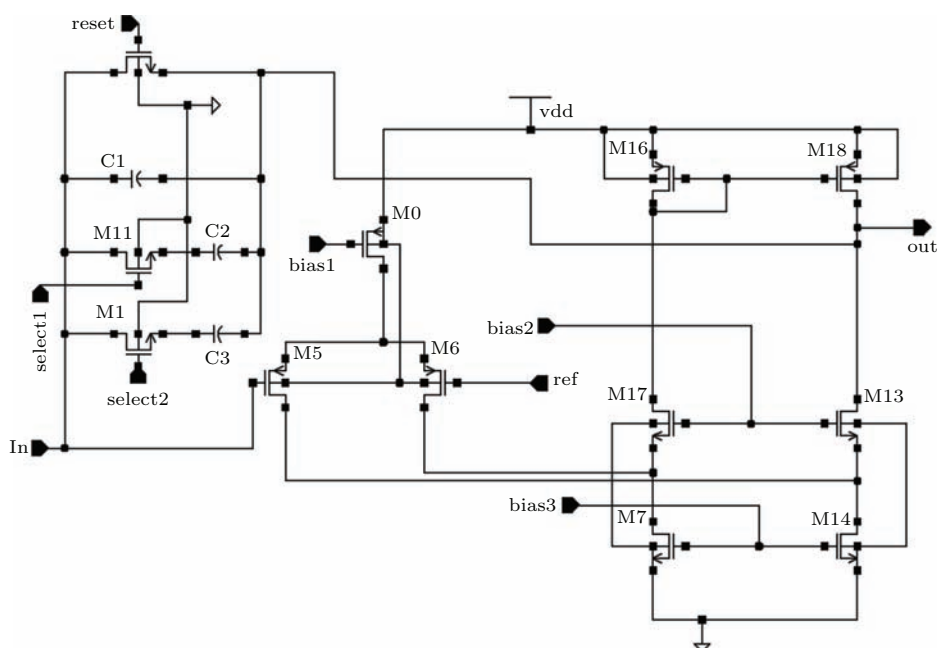


图3 读出电路CTIA部分结构图

Fig. 3. CTIA structure of readout circuit.

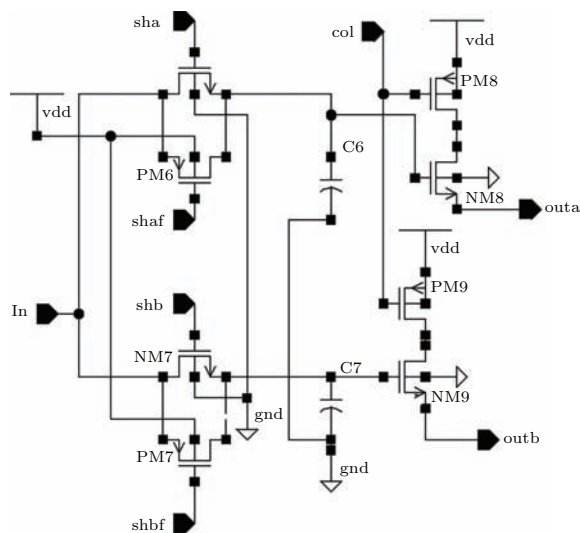


图4 读出电路低功耗的CDS N跟随结构图

Fig. 4. Low power CDS N following structure of readout circuit.

3 电路仿真及分析

3.1 电路非均匀性仿真分析

为分析电路非均匀性产生的原因, 本文对不同条件下的电流镜进行了非均匀性仿真. 当电流镜版图地线采用金属第二层铝, 宽度为 $10\ \mu\text{m}$, 160 线列

电路的长度为 $12000\ \mu\text{m}$ 时, 其计算其电阻大小为

$$R = \frac{12000}{10} \times 0.08 \approx 100\ \Omega. \quad (1)$$

图5是考虑 $12000\ \mu\text{m}$ 地线电阻对其进行的仿真结果图.

从仿真结果可以看出, 第一元的电流为 $78.8084\ \mu\text{A}$, 最后一元的电流为 $73.6939\ \mu\text{A}$, 第一元和最后一元的电流差异为 $5.1145\ \mu\text{A}$, 等效于第一元和最后一元串接了一个大小不同的电阻, 从而引起长线列电路的不均匀性, 其表现形式为每元的输出电压不均匀, 导致输出信号不能精确衡量不同探测元的信号. 若将地线宽度增加到 $100\ \mu\text{m}$, 则地线电阻可以减小到 $10\ \Omega$, 仿真后可以得出, 第一元为 $78.8084\ \mu\text{A}$, 最后一元电流为 $78.3864\ \mu\text{A}$. 与前面相比, 电流的差别由原来的 $5.1145\ \mu\text{A}$ 减小到 $0.422\ \mu\text{A}$, 可计算得到电路的非均匀性由原来的近 10% 减小到低于 1%, 等效于第一元到最后一元串接的电阻差异很小, 电路的非均匀性能得到很大的改善. 从仿真结果可以分析出, 电流镜 MOS 管漏源电流的源极对电压特别灵敏, 源极端微小的电压变化会对电流镜产生较大的影响, 导致长线列电流镜的非均匀性. 仿真分析结果表明: 在电流镜设计时, 采取适当加大地线宽度方法, 可保证各项性能指标不受影响的前提下, 有效提高电路的均匀性.

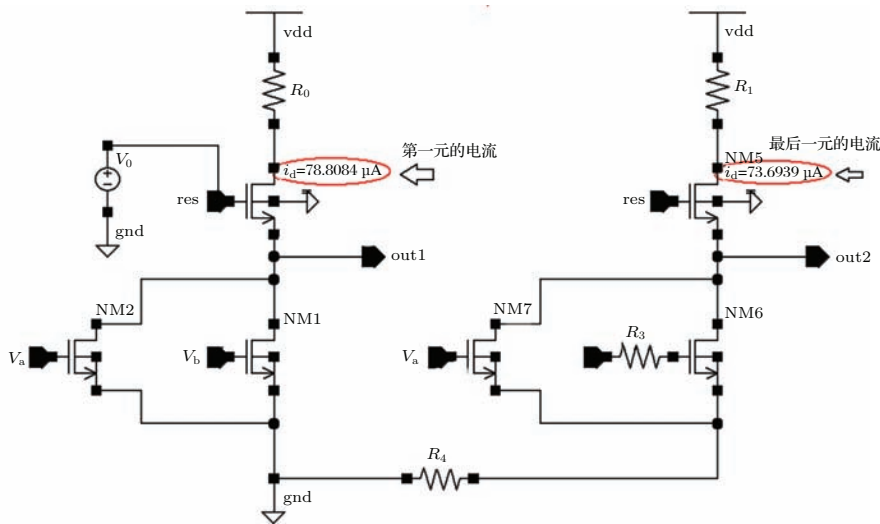


图5 电流镜的非均匀性仿真结果图

Fig. 5. Non-uniformity simulation results of current mirror.

3.2 噪声仿真分析

为了正确分析电路的噪声, 需要对 V_{ref} 、输出 N 跟随 BIAS, V_a , V_b , 探测器 V_{bias} 端的电压变化与输出电压变化的关联进行仿真, 才能合理设置外偏置电压的精度, 降低系统噪声. 表 1 为仿真分析结果表.

表 1 噪声仿真分析结果
Table 1. Noise simulation results.

电压	V_{ref}	N 跟随 BIAS	V_a	V_b	探测器 V_{bias}
基准电压/V	1	2	3.4	1.15	5
改变后电压/V	1.01	2.01	3.41	1.16	5.01
输出电压/V	3.576	3.464	3.206	3.400	3.388
关联度/10 mV	92	1	258	65	77

在基准电压的偏置下, 输出电压的基准值是 3.465 V, 从上表可以分析出, 当 V_a 从 3.4 V 增加到 3.41 V 时, 其输出电压变为 3.206 V, 比基准值降低了 258 mV, 其关联度为 258 mV/10 mV, V_a 对电路的输出影响最大, 是影响器件噪声的关键偏压, 为了降低组件的噪声, V_a 需要使用高精度电源, 其次是 V_{ref} , 探测器 V_{bias} 与 V_b , N 跟随的 BIAS 对输出影响最小, 基本不会对器件的噪声产生影响, 其偏压可以使用普通的电压源.

3.3 电路总体仿真分析

首先, 对电路的响应进行了仿真, 其参数设置分别为差分放大器的 $V_{ref} = 1$ V, 电流镜的两个控

制电压粗调 $V_a = 3.4$ V, 微调 $V_b = 1.15$ V, N 跟随的偏置电压设为 2 V, 积分时间为 40 μ s, select1 和 select2 都接高电平, 即积分电容为 50 pF, 输出端对电源接 1 k Ω 电阻, 探测器敏感单元设为变量从 50.5 k Ω 到 49.5 k Ω , 变化步长为 0.2 k Ω . 图 6 为 CTIA 输出端电压的仿真结果. 从图中可以得出, CTIA 输出端的电压对敏感电阻的响应为 200 mV/200 Ω . 由于有 CDS, N 跟随和输出级 P 跟随, 所以最终输出电压对敏感电阻的响应比 CTIA 输出端的稍小 [23], 从图中可以看出, 电路的最终响应输出结果为 118.857 mV/200 Ω , 即 0.594 mV/ Ω .

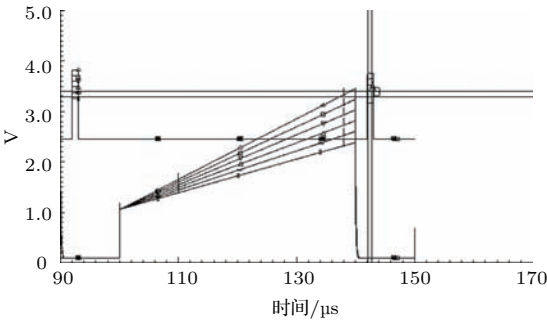


图6 电路的 CTIA 输出端仿真结果图

Fig. 6. Simulation results of CTIA output.

当把采样的积分时间改为 10 μ s 时, 其输出结果变小为 0.137 mV/ Ω . 通过调节积分时间可以满足设计任务要求, 其设计任务要求是 0.294 mV/($\Omega \cdot K$) (8—14 μ m), 对 160 线列总体电路进行了 1 ms 的 tran 仿真, 其结果如图 7 所示. 图中前段的探测器电阻从 49 k Ω 变化到 51 k Ω , 变化步长为

0.2 k Ω , 后段的探测器电阻从 45 k Ω 变化到 55 k Ω , 变化步长为 0.5 k Ω .

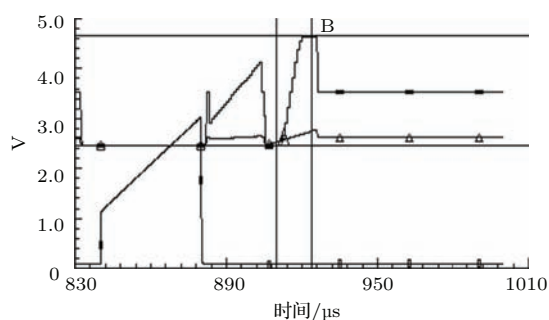


图7 电路的瞬态仿真结果图

Fig. 7. Transient simulation results of circuit.

从上图可以看出, 输出电压从 2.45729 V 到 4.64722 V, 其摆幅为 2.18993 V, 总功耗 (包含探测器) 小于 100 mW. 通过调节探测器 V_{bias} 能使电路适合不同的阻值探测器, 由于工作电压不能太高, 电路对探测器阻值的适应范围在 20 k Ω 到 100 k Ω 之间.

为了计算电路对 160 元探测器各元电阻的非均匀性适应能力, 对电路进行如下计算: 按输出摆幅为 2 V, 积分时间 40 μs , 积分电容 50 pF 计算 (探测器按 4 k Ω 电阻变化), 流进积分电容的电流大小为

$$I = \frac{CU}{t} = \frac{50 \times 10^{-12} \times 2}{40 \times 10^{-6}} = 2.5 \mu\text{A}. \quad (2)$$

计算结果表明当探测器的非均匀性小于 8% 时, 可以使所有像元出现, 电路 1% 的非均匀性指标可满足系统的非均匀性要求.

4 测试结果及分析

流片完成后, 读出电路与 160 线列非制冷红外探测器进行了互连, 并对组件进行了以下几方面的测试, 其结果如下:

4.1 功能测试

当器件通电正常工作时, 利用加热的烙铁慢慢靠近器件, 能发现输出电压有明显的变化, 输出摆幅大于 2 V, 说明器件能正常工作, 红外辐射信号能顺利读出. 然后用面源黑体对器件进行了定量测试^[24], 因为面源黑体具有很好的温度均匀性和对温度变化的快速响应特征, 故可认为被测信号均来源于均匀温度物体. 其参数设置分别为积分时间

20 μs , 积分电容 50 pF, 面源黑体的温度由 20 $^{\circ}\text{C}$ 升到 35 $^{\circ}\text{C}$, 测试输出信号的变化. 采用示波器显示读出电路和探测器互连后功能测试的电压输出情况, 其结果如图 8 所示. 横轴表示顺序读出信号, 纵轴是图像信号.

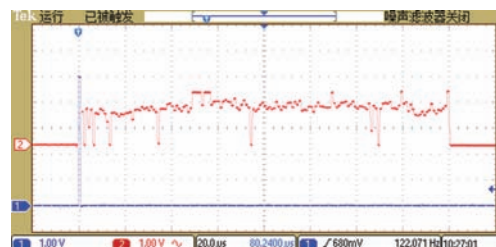


图8 与 160 元探测器互连后电路功能的测试结果

Fig. 8. Function testing of circuit connected with 160 line detector.

根据测试结果计算可得器件对红外辐射的定量值为 0.294 mV/($\Omega \cdot \text{K}$) (8—14 μm), 与设计仿真结果基本相符. 然后再改变积分时间和积分电容这两个参数设置, 测到输出信号大小的规律变化, 与电路设计仿真结果一致, 说明器件工作原理正确, 电路设计方法可行. 在测试时, 还对非制冷红外探测器每元的电阻大小和示波器显示的信号电压大小进行了一一对比, 图 8 中几元低信号对应的是非制冷红外探测器的死像元和亚死像元, 因为探测器的死像元和亚死像元电阻值比正常值小, 导致输出电平明显偏离正常位置, 所以输出信号有几元低信号.

4.2 电路的非均匀性测试

在参数设置为积分时间 20 μs , 积分电容 50 pF 的条件进行测试. 以输出中间值电压为参考点, 外加可变电阻方法^[25]. 首先将可变电阻连接到读出电路的第 1 元输入端, 调节可变电阻大小使读出电路第 1 元输出电压值为 3 V, 此时可变电阻大小可等同于非制冷红外探测器电阻的基准值, 然后将该可变电阻按顺序依次连接到第 2 元到第 160 元测量每元的输出电压基准值. 完成 160 元基准测量后再将可变电阻连接到读出电路的第 1 元输入端, 调节可变电阻大小使读出电路第 1 元的输出电压值为 4 V, 此时可变电阻大小可等同于非制冷红外探测器接受红外辐射后的电阻值, 第 1 元的输出信号为 1 V, 再将该可变电阻按顺序依次连接到第 2 元到第 160 元测量每元的输出电压值, 每元的输出电压值与每元的基准值之差就是每元的信号值, 该方法确保了每元都有相同的激励信号. 根据测量结果可求

出160元的平均信号值, 最大信号值减出最小信号值可得到最大差值, 差值除以平均值, 可定义为电路的非均匀性. 通过测量计算, 该160线列读出电路的非均匀性小于1%. 其测试结果说明在设计电路时采用左右对称设计两端的电流镜方式和增加电流镜地线宽度的方法, 能减小电流镜对地线的敏感性, 有效地提高长线列电路的非均匀性指标.

4.3 噪声测试

在环境稳定的条件下, 利用多次(100次)采样求均方差的方法测量每个响应元的噪声^[26]. 该系统利用Labview编写了标准的噪声测试程序, 用NI6110采集卡对各个探测元的输出电压进行采样. 将读出电路的移位寄存器输出脉冲连接到采样系统中进行同步, 在测试时, 采集元数设定为160元, 采样次数设定为100次, 采样完成后, 该程序先求出每元的100次采样电压的均方根噪声电压, 再求160元的噪声平均值. 为减小环境噪声对电路的干扰及提高测试准确性, 噪声测量时, 把测试系统的低噪声放大器倍数设置为100倍, 经多次检测, 其噪声值结果均集中在 5×10^{-4} V到 10^{-3} V之间, 所以可以得出本文研制的器件噪声值小于1 mV, 满足低噪声指标. 从测试结果可以得出在电路设计时采用差分输入的一级折叠式共源共栅结构能合理地克服振荡现象, 使用高精度 V_a 偏置电压能有效的降低电路的输出噪声.

4.4 功耗测试

为测量电路的总功耗, 需在偏置回路和读出电路供电回路中都串入电流表, 测量各部分的工作电流, 并通过累加各部分的功耗实现电路总功耗的计算. 经过测试和计算, 电路的总功耗小于100 mW, 达到预定设计指标. 测试结果说明了本文采用的低功耗CDS双采样N管跟随电路方法能有效性地减低电路总功耗, 其只有在col端为低电平时开启, 有功耗, col端为高电平时N跟随管关闭, 功耗几乎为零, 所以电路总功耗较小.

从上面的各项测试结果和分析可以得出, 基于电流镜方式的非制冷红外探测器电路在功能、非均匀性、噪声、功耗等性能指标方面与电路设计仿真结果相符, 影响电路非均匀性指标的理论分析正确, 在电路设计时采用的方法对改善电路的非均匀

性有效, 同时也进一步验证了降低电路噪声和功耗的设计方法.

5 结 论

设计了一种基于电流镜方式的CMOS非制冷红外探测器160元线列读出电路, 对电路进行了仿真与计算、流片与测试等. 结果表明: 采用左右对称设计两端的电流镜方式和增加电流镜地线宽度的方法, 能减小电流镜对地线的敏感性, 有效地提高长线列电路的非均匀性指标, 电路的非均匀性可由原来的近10%降到小于1%, 测试结果与仿真结果基本一致. 电路的其他各项指标也较为理想, 如总功耗约为100 mW, 输出摆幅大于2 V; 电路与160元非制冷红外探测互连后, 器件的均匀性与噪声性能参数都较好, 其噪声测试结果小于1 mV; 在积分时间为20 μ s的情况下, 器件的响应度为0.294 mV/ Ω , 整体性能表现优良. 利用左右对称设计两端的电流镜方式和宽电流镜地线的电路设计方法可应用到将来更大规模的超长线列非制冷探测器读出电路的研制中, 为我国在航天空间领域的发展提供了实用的技术支持.

参考文献

- [1] Cao J M, Chen Z J, Lu W 2010 *J. Infrared Millim. W.* **29** 97 (in Chinese) [曹君敏, 陈中建, 鲁文高 2010 红外与毫米波学报 **29** 97]
- [2] Qin L, Jiang Y D, Lu J 2006 *Foreign Electronic Measurement Technology* **25** 32 (in Chinese) [秦良, 蒋亚东, 吕坚 2006 国外电子测量技术 **25** 32]
- [3] Yuan H H, Chen Y P 2014 *Infrared and Laser Engineering* **43** 762 (in Chinese) [袁红辉, 陈永平 2014 红外与激光工程 **43** 762]
- [4] Liu M, Xu X F, Wang Y L 2013 *Acta phys. Sin.* **62** 188501 (in Chinese) [刘明, 徐小峰, 王永良 2013 物理学报 **62** 188501]
- [5] Zheng G F, Pei Y B, Wang X, Zheng J Y, Sun D H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 66102
- [6] Huang J, Zhao Q, Yang H, Dong J R, Zhang H Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 127307
- [7] Chen Q, Yi X J, Yang Y, Yi L 2006 *Int. J. Infrared Millim. W.* **27** 1281
- [8] Alam M S, Predina J P 2003 *Opt. Eng.* **42** 3491
- [9] Weiler D, Hochschulz F, Wurfel D 2014 *Infrared Technology and Applications XL*, Baltimore MD USA May 5 2014 p90701
- [10] Ayers S, Gillis K D, Lindau M 2007 *IEEE T. Circuits-I* **54** 736

- [11] Dsouza A I, Dawson L C, Staller C, Wijewar P S, Dewames R E, Mclevige W V 1997 *J. Electron. Mater.* **29** 630
- [12] Yoon N Y, Kim B H, Lee H C, Kim C K 1999 *Electron. Lett.* **35** 1507
- [13] Kulah H, Akin T 2003 *IEEE T. Circuit-II* **50** 181
- [14] Lee I I 2010 *Infrared Phys. Techn.* **53** 140
- [15] Hsieh C C, Wu C Y, Jih F W, Sun T P 1997 *IEEE T. CIRC. SYST. VID.* **7** 594
- [16] Yu T H, Wu C Y, Chin Y C, Chen P Y, Chi F W, Luo J J 2000 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Geneva Switzerland, May 28–31, 2000 p493
- [17] Hsieh C C, Wu C Y, Sun T P, Jih F W, Cherng Y T 1998 *IEEE J. SOLID-ST. CIRC.* **33** 1188
- [18] Sang G K, Doo H W, Hee C L 2005 *IEEE T. CIRCUITS-II* **52** 553
- [19] Karim S K, Nathan A 2001 *IEEE Electr. Device L.* **22** 469
- [20] Yuan H H, Yuan J H, Wang J H 2005 *Chinese Journal of Semiconductors* **26** 790 (in Chinese) [袁红辉, 袁剑辉, 王京辉 2005 半导体学报 **26** 790]
- [21] Byunghpk K, Hee C L 2002 *Electron. Lett.* **38** 854
- [22] Chen L L, Xi N, Chen H Z, King W C 2010 *IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference*, Monterey, California, USA, Oct12–15, 2010 p230
- [23] Bhan R K, Gopal V, Saxena R S, Singh J P 2004 *Infrared Phys. Techn.* **45** 81
- [24] Hsieh C C, Wu C Y, Sun T P 1997 *IEEE J. SOLID-ST. CIRC.* **32** 1192
- [25] Kumar S, Butler D 2009 *IEEE SENS. J.* **9** 411
- [26] Yvon D, Sushkov V, Bernard R, Bret J L, Cahan B, Cloue O 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **481** 306

Non-uniformity study on readout circuit for uncooled IR detector*

Yuan Hong-Hui[†] Chen Yong-Ping

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(Received 2 October 2014; revised manuscript received 11 January 2015)

Abstract

For long line uncooled infrared detectors, the non-uniformity of different detecting elements is the key parameter in measuring the circuit performance. So far there have been few research reports in this area. Most uncooled infrared detector circuits require corresponding blind detector for readout circuit design, which increases the complexity of uncooled infrared detector. In addition, the performances of these circuits need to be further improved in practical applications. In order to achieve high performance readout of the long line uncooled infrared detectors, a kind of 160 element readout circuit based on current mirror is designed in this paper. The readout circuit is composed of current mirror input part, capacitor feedback transimpedance amplifier (CTIA), and correlated double sampling (CDS) output circuit. The circuit is fabricated by using the 0.5 micron technology. The non-uniformity of circuit is obviously improved by reasonable parameter setting and current mirror circuit layout. Transconductance amplifier CTIA with capacitance negative feedback is used in the circuit. The integral capacitor consists of three capacitors whose capacitances are 10 pF, 20 pF and 20 pF respectively, thus the circuit can realize different integration capacitances, which forms different magnifications. The circuit can meet different response rates of uncooled detectors. Folded-cascode structure is adopted as the CMOS differential amplifier. The open loop gain is over 80 dB. This single-state folded-cascode construct can overcome the two-stage amplifier's disadvantages, which easily leads to oscillations. The CDS N SF (source follow) and P SF are adopted as the circuit output, the output swing can easily be greater than 2 V. On average, the CDS N SF and P SF power consumptions are very low. So the total power consumption of 160 line circuit is lower than 100 mW. In the test, the non-uniformity of the readout circuit decreases from 10% to 1%. This result is in accordance with simulation result on non-uniformity. The other test results of total power consumption and the output amplitude also agree with simulation results. The readout circuit has good noise characteristics and the output noise is lower than 1 mV. When the readout circuit and uncooled infrared detector are connected, the infrared signal can be well read out. When the integration time is 20 μ s, the device response is 0.294 mV/ Ω . The overall system performance is very good. This circuit design based on current mirror has laid the technical foundation for developing readout circuit of the very large scale uncooled infrared detector in the future.

Keywords: current mirror, uncooled IR detector, non-uniformity, readout circuit

PACS: 85.40.-e, 84.30.Bv, 84.30.Jc

DOI: 10.7498/aps.64.118503

* Project supported by Chinese Academy of Sciences (Grant No. 61501060305).

[†] Corresponding author. E-mail: yuanhonghui@163.com