

文章编号:1001-5078(2007)增刊-0981-04

# 红外探测器背景抑制读出结构设计研究

赵晨<sup>1,2</sup>, 丁瑞军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**长波红外焦平面探测器一般工作在高背景下, 信号电流小于背景电流, 器件本身暗电流也较大, 信号读出时积分电容极易饱和, 这都不利于获得理想的信噪比。通过在读出电路输入级中增加电流抑制结构, 可有效提高积分时间, 改善动态范围和对对比度。本文介绍了红外焦平面读出电路中几种典型的背景电流及暗电流抑制技术, 依次叙述不同结构背景及暗电流抑制的实现原理, 并比较各个结构的优缺点, 针对不同电路结构的特点, 通过典型电路仿真分析, 确定了它们在各种红外焦平面读出电路输入级中的应用范围。

**关键词:**背景抑制; 暗电流; 信噪比; 读出电路; 红外焦平面

**中图分类号:** TN215; TN721.3

**文献标识码:** A

## Background Suppression of Readout Circuits for IR Detectors

ZHAO Chen<sup>1,2</sup>, DING Rui-jun<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Long-wavelength infrared focal plane arrays, which have large dark currents, usually work under high backgrounds. The photo current is much smaller than background current. Therefore the integration capacitor is easily saturated. All of these lead to a poor SNR (signal noise ratio). Longer integration time, better contrast and dynamic range can be achieved effectively by adding a current suppression structure. In this paper, several typical background suppression techniques and how they work were introduced. According to the advantages and disadvantages of each structure compared through simulation, different fields of application for which these background suppression methods were suitable had been pointed out in the use of infrared focal arrays readout circuits.

**Key words:** background suppression; dark current; SNR; readout circuit; IRFPA

### 1 引言

信噪比是红外焦平面器件的关键参数, 良好的信噪比是获取更高清晰度红外图像的基础。

对于达到背景限性能的探测器, 主要噪声是光子噪声<sup>[1]</sup>, 除了对光敏元进行改进, 要提高信噪比, 就须增加积分时间。

随着焦平面规模的增大, 单元面积变小, 通过增大积分电容来延长积分时间非常困难。长波红外器件工作在高背景下, 会产生很大的背景电流; 另外长波器件本身的暗电流也比较大, 这个问题就更加突出。

为了克服这个问题, 在焦平面读出电路中增加电流抑制结构, 在电流注入积分电容前消除背景电

流和暗电流, 可以有效提高积分时间, 改善动态范围和对对比度。

### 2 读出电路中消除暗电流和背景电流的方法

读出电路的背景抑制主要有两类方法: 电流复制单元法和电压-电流转换法。

#### 2.1 电流复制单元法

电流复制单元(Current Copier Cell)是一种记忆并复制电流的电路。

**作者简介:** 赵晨, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为红外焦平面读出电路设计。E-mail: zhaochen\_mail@gmail.com

**收稿日期:** 2007-06-19

电流复制单元的优点是结构简单,能够完成记忆和复制电流两个功能。相对电流镜而言,它对 MOS 管和电容的精度要求不是特别严格<sup>[2]</sup>。

### (1) 简单背景电流抑制电路

图 1 所示为加入了电流复制单元(由  $M_{p2}$ ,  $C_M$ ,  $M_{cal}$  构成)的 BDI(Buffered Direct Injection)型读出电路单元。

该电路的工作分为两步:第一步是校准——把焦平面探测器对准等效背景(如关闭机械快门),并且使  $M_{cal}$  导通,此时探测器的背景电流和暗电流  $I_{BACK}$  被复制到  $M_{p2}$  上,且电容  $C_M$  记录了维持该电流的  $M_{p2}$  管所需的栅源电压值。第二步积分读出——关断  $M_{cal}$ ,探测器开始正常观测,输出电流为  $I_{SIG} + I_{BACK}$ ,  $C_M$  上的电压将使流过  $M_{p2}$  的电流维持在  $I_{BACK}$ ,所以积分电流  $I_{int} = (I_{SIG} + I_{BACK}) - I_{BACK} = I_{SIG}$ ,完成背景抑制功能。

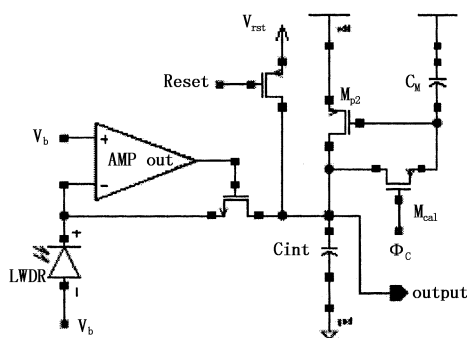


图1 简单背景电流抑制单元电路

### (2) 具有记忆功能的背景抑制电路

图 1 电路结构简单,能完成背景抑制功能,但存在一个很大的缺点——因为栅极漏电流的存在,记忆电容  $C_M$  上的电压保持的时间有限,为保证  $M_{p2}$  能准确复制  $I_{BACK}$ ,探测器每获取一帧图像都要进行一次校准<sup>[3]</sup>,这大大降低了帧频。为了克服漏电流问题,实现一次校准长时间工作,就要增加新的电路结构,对记忆电容进行刷新。

如图 2 所示为改良后的 BDI 单元结构<sup>[4]</sup>,工作模式分为校准和积分读出两步。

在校准时,探测器中仅存在背景电流和暗电流  $I_{back} + I_{dark}$ ,该电流被复制到  $M_{p2}$  上,  $C_M$  记忆了  $M_{p2}$  的栅极电压,同时这个电压值经过 ADC 转换成数字量,被储存到 memory 中。到此校准完成。

在积分读出时,储存在 memory 中的数字量经 DAC 还原为模拟电压,周期性地对记忆电容  $C_M$  进行刷新,从而消除了漏电流对  $C_M$  电压的影响,只需一次校准,就能维持电路长时间的积分读出工作。

该电路还有一个功能——由于盲元的暗电流远大于或小于正常值,所以量化后的数字量为全 1 或

全 0,据此能方便地判断光敏元是否正常,还能通过这个数字量实现对盲元的屏蔽或增加修正算法。

通过增加 ADC 和 DAC 实现了对背景电流的长时间记忆,但增加的电路结构也引入了新的问题——复制错误,即背景抑制结构产生的电流相对实际背景电流值有较大误差。这个误差会降低电路对小信号的分辨能力<sup>[3]</sup>,影响灵敏度。

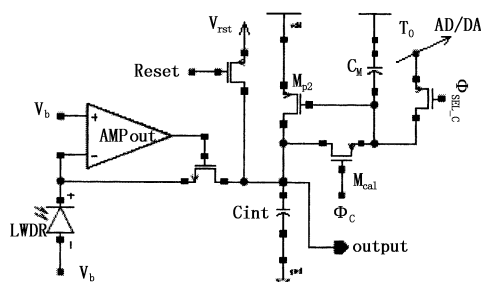


图2 改进后的背景抑制单元电路

产生复制错误的原因主要是:

1) 控制脉冲信号  $\Phi_{SEL\_C}$  的时钟馈通效应 (clock feedthrough)。当关闭 MOS 开关管时,反型层上的电荷会有一部分注入  $C_M$ ,从而改变  $C_M$  的电压,使复制出现错误。增大电容  $C_M$  可以减小这个误差,也可以增加一些更加复杂的电路结构来缓解时钟馈通效应<sup>[5]</sup>,但焦平面读出电路单元面积限制了这些方法的使用。

2)  $M_{p2}$  管的沟道长度调制效应。因为  $M_{p2}$  管的漏端电压在积分读出时和校准时不一样,且各个单元之间也不一样,所以即使保证栅压一致,仍然不能使  $M_{p2}$  管精确复制背景电流。

3) DAC 本身存在一定的噪声,每次对  $C_M$  进行刷新时,这个噪声就被引入了  $V(C_M)$ 。所以该电路要求 DAC 的噪声必须非常小。

### (3) 两步背景抑制法

为克服上述问题,对图 2 的电路进一步改良,采用两步背景抑制法<sup>[3]</sup>,如图 3 所示。电路采用了 BDI 结构,由于运放稳定了  $M_{p2}$  管漏端的电位,从而有效避免了图 3 电路中  $M_{p2}$  管沟道长度调制效应引起的误差。

在校准模式时,  $\Phi_c$  打开。第一步由全局电流镜  $CM_1$  粗略地复制背景电流(包括暗电流)基底部分;第二步,通过  $V(C_M)$  和  $M_{p2}$  管对剩余部分进行精确复制。图 4 所示为两步背景抑制法电流复制部分的  $I(M_{p1}) - V(C_M)$  特性曲线,校准模式的第一步是选择其中一条电流曲线,第二步则是在线上选定一个工作点。

在积分读出时,  $\Phi_c$  关闭,电路根据  $C_M$  上记忆的电位和  $CM_1$  的镜像电流实现背景抑制功能。

图3中 $I_s$ 由一全局电流镜提供,作用是保证校准模式时反馈回路的正常工作,防止关断 $M_{p2}$ 。

与图2的电路相比,图3中 $M_{p1}$ 管可看作一个大电阻, $M_{p2}$ 管的电流对 $V(C_M)$ 不是非常敏感,从而大大减小了由于时钟馈通效应和D/A转换噪声引起的复制错误。

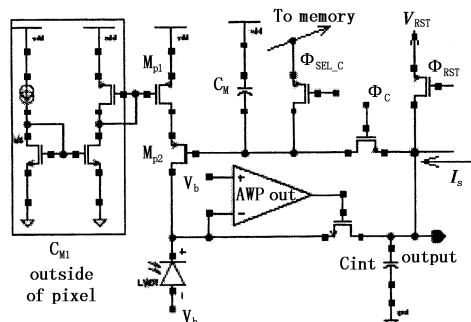


图3 采用两步背景抑制的单元电路

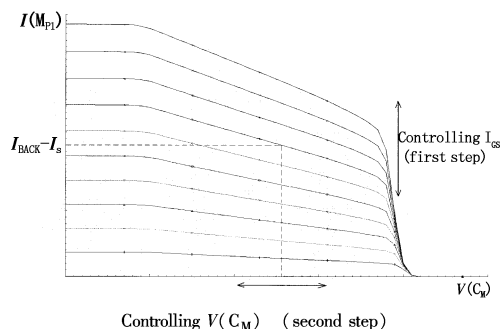


图4 两步背景抑制法  $I(M_{p1}) - V(C_M)$  特性

## 2.2 电压-电流转换法 (voltage-to-current converter)

电流复制单元结构比较复杂,所占用的芯片面积较大,容易受到焦平面器件单元尺寸的限制。电压-电流转换法的背景抑制结构非常简单,易于在单元内实现。

如图5所示,调节 $V_{tune}$ 使通过 $M_{tune}$ 管的电流等于背景电流 $I_{back}$ (包括暗电流),注入积分电容的电流为: $(I_{back} + I_{sig}) - I_{back} = I_{sig}$ ,从而实现背景抑制功能<sup>[6]</sup>。

电压-电流转换法结构非常简单,但是缺点是不能获取精确的、即时的光敏元背景电流和暗电流,只能根据事先测量的光敏元背景电流值比较粗略地设定 $V_{tune}$ ,即只是把每个光敏元输出的电流中减去一定的基底部分。而且 $M_{tune}$ 管的工艺误差会使各单元的背景抑制电流存在差异。因为不可能对每个单元分别设定 $V_{tune}$ ,无法消除各光敏元的背景电流、暗电流存在不一致性。

由于 $M_{tune}$ 管工作在亚阈值区,电流与 $V_{tune}$ 呈指数关系,所以对于 $V_{tune}$ 的精度和稳定性有相当高的要求,如果 $V_{tune}$ 本身噪声不能得到很好地控制,会对

信号产生严重影响。

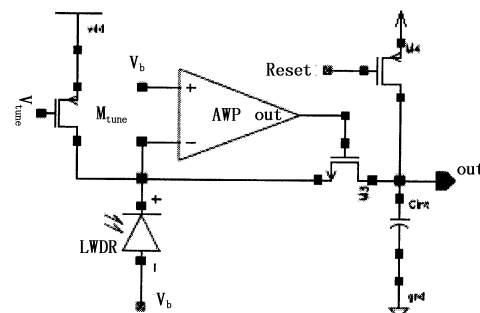


图5 电压-电流转换法背景抑制结构单元电路

## 3 相关电路结构的仿真及适用性分析

采用CSMC 0.6 $\mu$ m双多晶硅混合工艺SPICE模型库,对上述背景抑制结构进行仿真。

### 3.1 电流复制单元记忆电容的刷新频率

记忆电容电压的变化会导致电流复制单元产生复制误差,必须定时对 $C_M$ 进行刷新,使电流复制误差控制在一定范围内。设引起记忆电容 $C_M$ 电压变化的栅极漏电流为1pA。表1为复制误差达到10%的时间。随着 $C_M$ 的增大,保持时间 $T_{HOLD}$ 呈线性上升。对于1pF的 $C_M$ ,刷新频率须不小于140Hz。在CSMC 0.6 $\mu$ m双多晶硅混合工艺中,1pF的PIP电容面积典型值为1428.6 $\mu$ m<sup>2</sup>,面阵器件单元面积有限,还必须保证积分电容值不能太小(非共享积分电容),则 $C_M$ 的值可能非常小(<1pF),需要较高的刷新频率以维持正确的复制电流值。显然,如果不用ADC/DAC和memory,而通过机械方式校准记忆电压,电路没有可用性。

表1 复制误差达到10%的时间 $T_{HOLD}$

| $C_M$ /pF      | 0.5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $T_{HOLD}$ /ms | 3.84 | 7.19 | 13.8 | 20.5 | 27.1 | 34.2 |

### 3.2 电流复制单元法的背景抑制电路比较

分别对图2和图3电路进行仿真,图6给出了两种结构背景电流的复制误差对比数据。图2电路的复制误差在10%左右,而采用两步背景抑制法的复制误差可控制在3%,显著提高了背景电流的复制准确性。原因是图2电路中 $M_{p2}$ 工作在亚阈值区,复制电流与 $V(C_M)$ 呈指数关系,故时钟馈通效应引起 $V(C_M)$ 的波动使复制电流偏离正确值;另外 $M_{p2}$ 的沟道调制效应也加大了误差。而两步背景抑制法中,只要选取合适的 $I_{GS}$ ,使工作点落在图4所示 $I-V$ 曲线的平缓段,复制电流对 $V(C_M)$ 的敏感度将大大降低,从而减小时钟馈通效应引起的误差。图7是 $M_{p1}$ 管取不同沟道长度时, $I_{DS}$ 与 $V(C_M)$ 的关系。 $M_{p1}$ 沟道长度越大,则 $I_{DS}(M_{p1}) - V(C_M)$ 曲线越平缓,从而电流复制误差越小。

由于各个光敏元存在非均匀性,光敏元背景电流和暗电流存在一定偏差,电流复制单元可以根据各光敏元的情况自动调节背景抑制电流。但是过于平缓的  $I_{DS}(M_{pl}) - V(C_M)$  曲线将减小  $V(C_M)$  对背景抑制电流的调节范围(图7),所以  $M_{pl}$  管的沟道长度不能过大。

$M_{pl}$  管的沟道长度必须综合考虑复制精度,调节范围和面积,做出最优设计。

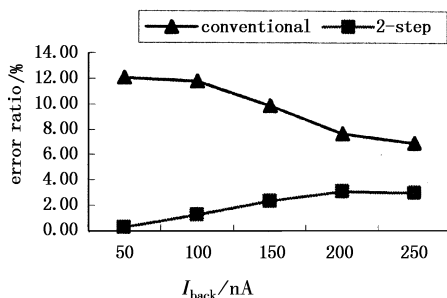


图6 两种背景抑制结构的误差比较

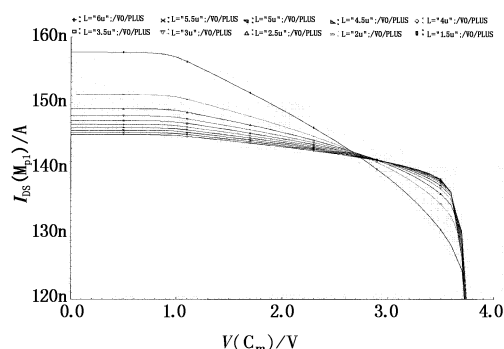


图7  $M_{pl}$  管取不同  $L$  时的  $I_{DS}(M_{pl}) - V(C_M)$  曲线

### 3.3 电压-电流转换法

电压-电流转换法结构非常简单,由于  $M_{tune}$  管工作在亚阈值区,  $I_{DS}$  与  $V_{tune}$  呈指数关系,所以为保证背景抑制电流的准确性,  $V_{tune}$  必须满足高精度和低噪声两个要求。

$M_{tune}$  管  $W/L$  取  $3\mu m/10\mu m$ , 根据不同背景抑制电流值,设定  $V_{tune}$  (精度取  $10mV$ ), 仿真  $V_{tune} \pm 10mV$  产生的误差,结果见于表3,从  $50nA$  到  $250nA$ ,  $V_{tune}$  噪声引起的背景抑制电流误差约为  $8\% \sim 16\%$ 。若要降低这一误差,则要求  $V_{tune}$  的精度和噪声都须小于  $10mV$ 。

另一个降低误差的方法是增大  $M_{tune}$  管的沟道长度,减小管子的宽长比。如图8所示,随着沟道长度增加,  $I_{DS}(M_{tune}) - V_{tune}$  曲线变得平缓,从而减小了  $V_{tune}$  波动引起的电流波动。

表3  $V_{tune}$  引入的背景抑制电流误差

| $I_{back}/nA$       | 50     | 100    | 150     | 200     | 250    |
|---------------------|--------|--------|---------|---------|--------|
| $(V_{tune}) + 10mV$ | -15.2% | 12.48% | -10.95% | -10.02% | -8.41% |
| $(V_{tune}) - 10mV$ | 15.33% | 13.55% | 11.65%  | 10.06%  | 8.7%   |

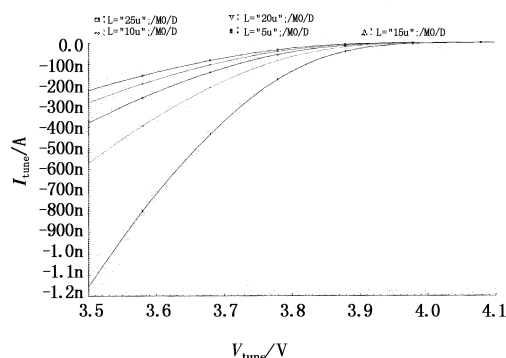


图8  $M_{tune}$  管取不同沟道长度  $L$  对应的  $I_{tune} - V_{tune}$  曲线

## 4 结论

根据仿真结果,电流复制单元法背景抑制电路(尤其是图4)相对而言具有更好的精度,可以对每个单元实现“量身定制”式的背景抑制,从而改善各单元的非均匀问题。缺点是电路结构复杂,要求高精度、低噪声的 ADC 和 DAC,需要额外的控制脉冲信号,并且要在单元内增加一个电容,占用很大的面积,不利于在高密度红外焦平面阵列中应用。适用于对精度要求高,单元面积相对较大的情况。

电压-电流转换法的背景抑制结构非常简单,但是背景抑制电流准确度受控制偏压精度的影响很大,且不能根据每个光敏元进行单独调整,无法消除探测器非均匀性。适用于单元面积严格受限的高密度面阵器件。

电流复制单元法或电压-电流转换法是实现背景电流和暗电流抑制功能的两类有效的方法,前者精度高,后者简单易行。背景抑制和暗电流抑制技术能延长积分时间,提高器件对微小信号的分辨能力,改善读出电路的动态范围和信噪比,是红外焦平面器件,尤其是长波、甚长波器件不可缺少的技术。

### 参考文献:

- [1] B H Kim, N Y Yoon, H C Lee. Novel concept of TDI readout circuit for LWIR detector [C] // Proc. SPIE, 2000, 4028: 166-172.
- [2] Daubert S J, et al. Current Copier Cells [J]. Electronics Letters, 1988, 24(25): 1560-1562.
- [3] Doo Hyung Woo, Sang Gu Kang, Hee Chul Lee. Novel current-mode background suppression for 2-D LWIR applications [J]. IEEE transactions on circuits and systems - II: express briefs, 2005, 52(9): 1649-1651.
- [4] Byunghyuk Kim, Hee Chul Lee, Smart TDI readout circuit for long-wavelength IR detector [J]. Electronics Letters, 2002, 38(16): 854-855.
- [5] Lie H P. Switched capacitor feedback sample-and-hold circuit [P]. 1986, US patent 4 585956.
- [6] M W Ng, Y H Chee, Y P Xu. On-chip compensation of dark current in infrared focal plane arrays [Z]. ISCAS 2001, 2: 509-512.