

# 高光谱用长波红外探测器读出电路设计

岳冬青, 马 静, 李敬国, 于小兵  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:**介绍了高光谱长波红外探测器读出电路设计。设计基于 SMIC 0.35  $\mu\text{m}$  5.0 V 工艺, 文中介绍了电路的结构, 并对各组成模块及其优化结构、电路仿真做了详细介绍, 通过仿真对注入效率进行了分析计算, 电路经测试, 各项功能正常, 性能优良, 动态范围  $>71$  dB, 最大帧频  $>250$  Hz。

**关键词:**注入效率; 仿真; 线性度; 动态范围

**中图分类号:** TN216    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.019

## Design of ROIC for LWIR hyperspectral detector

YUE Dong-qing, MA Jing, LI Jing-guo, YU Xiao-bing  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The design of ROIC for LWIR hyperspectral detector is introduced in this paper. The circuit design is based on SMIC 0.35  $\mu\text{m}$  5.0V process. The circuit modules, its optimized structure and the circuit simulation are described in detail. The injection efficiency is analyzed and calculated through simulation. The circuit test shows that all functions of the ROIC are normal, the performance is excellent, the dynamic range is  $>71$  dB, the max frame frequency is  $>250$  Hz.

**Key words:** injection efficiency; simulation; linear; dynamic range

### 1 引 言

高光谱成像技术可根据不同的需要应用于可见/近红外波段 ( $0.35 \sim 2.5 \mu\text{m}$ )、中波红外波段 ( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ )、长波红外波段 ( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) 等光谱范围, 与传统的数据源相比, 高光谱数据具有光谱范围宽、频段多、光谱分辨率高、信息量大等特点<sup>[1]</sup>。

由于光谱信息本身是物体的固有属性, 物体的光谱差异信息可以作为识别目标的一种重要手段。高光谱成像技术的原理就是利用不同物体光谱上的差异, 在多个波段上分别获取能反映光谱差异的图像, 然后对同一对象不同波段上的图像依一定规则合成, 揭示出上述光谱差异, 因此高光

谱成像技术被广泛应用于海上目标探测和导弹预警研究中<sup>[2-3]</sup>。

本文介绍了一种适用高光谱长波  $1024 \times 512$  红外探测器的读出电路设计, 设计基于 SMIC 0.35  $\mu\text{m}$  5.0 V 工艺, 文章给出了电路结构, 对 DI 输入级注入效率进行了分析计算, 并对各组成模块及其优化结构、电路仿真做了详细介绍, 最后给出了实际电路的测试结果。

### 2 电路设计

读出电路主要包括像素级阵列、列处理电路、输出级、数字控制电路以及偏置电路等几部分, 其电路构成如图 1 所示。像素级完成光信号的收集, 列处

理电路完成电荷信号到电压信号的转换,输出级缓冲放大器为外部接口提供驱动,数字控制电路为像素阵列信号的逐行逐列读出提供必需的控制时序,偏置电路主要为模拟电路提供工作电压。

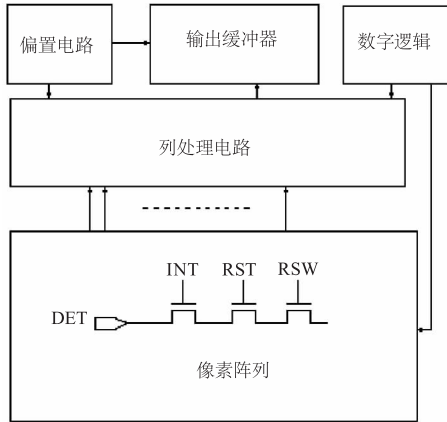


图1 电路构成图

Fig. 1 Circuit configuration

### 2.1 像素输入级

长波红外探测器用读出电路的像素输入级设计需要在电荷处理能力和注入效率间平衡把握,因此设计在电容跨阻放大器型 (CTIA) 和直接注入型 (DI) 间选择。

CTIA 结构最大的优点是可以调节电荷电压转换因子,提供精确的光电二极管的偏置,防止了电荷积分在探测器电容上,使光电流几乎全部累积在积分电容上,因此注入效率很高,其缺点就是占用面积较大,功耗较大。

DI 结构的特点是积分电容可以独立设计,具有独立的电容电压转换因子,可以为读出电路的链路起点提供更好的噪声性能,且几乎没有功耗,它的缺点是注入效率取决于注入管的跨导和探测器的动态阻抗,而注入管的跨导又直接受光电流影响。

由于长波谱段探测器的信号光电流和暗电流很强,要求像素输入级有很高的电荷处理能力,积分电容越大越好,为保证最大的积分电容,保证电荷处理能力,所以我们选用了 DI 结构,DI 结构所用 MOS 管数量很少,像素面积的 75% ~ 80% 可以用来做积分电容,可以保证设计要求的电荷处理能力。但长波探测器的动态阻抗很小,使得注入效率降低,因此需要对注入效率进行分析计算<sup>[4]</sup>。

DI 结构的注入效率  $\eta_{inj}$  公式如下:

$$\eta_{inj} = \frac{g_m R_{det}}{1 + g_m R_{det}} \left( \frac{1}{1 + \frac{j\omega C_{det} R_{det}}{1 + g_m R_{det}}} \right) \quad (1)$$

式中,  $C_{det}$  是探测器电容;  $R_{det}$  为探测器阻抗;  $g_m$  为像素输入 MOS 管跨导。  $C_{det}$  很小,通常只有几十飞法,所以计算时第二项忽略不计。

$$g_m = \frac{q I_{det}}{kT} \quad (2)$$

其中,  $q$  是单位电子的电量;  $k$  是波尔兹曼常数;  $T$  是温度。

注入管的跨导可以通过公式(2)计算,也可以通过模型的直流仿真获得。对长波红外探测器建立模型如图2所示,长波红外探测器的阻抗值一般在几兆欧到几百兆欧,将不同谱段的阻抗值接入像素级电路进行仿真,对光电流值在 2 ~ 20 nA 的范围内进行扫描,得到了不同电流值下的跨导  $g_m$ , 根据公式(1)计算出注入效率  $\eta_{inj}$ , 见表1。

表1 DI 注入效率

Tab. 1 Inject efficiency of DI stage

$I_{det}/nA$	$R_{det}/M\Omega$	$g_m/S$	$\eta_{inj}/\%$
2 ~ 20	100	0.13 ~ 1.0	92.9 ~ 99.0
2 ~ 20	1.5	1.85 ~ 2.56	73.6 ~ 79.3

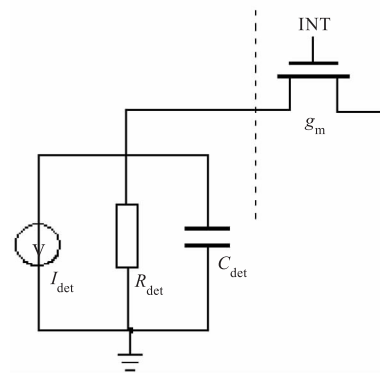


图2 直接注入模型

Fig. 2 Direct inject model

从表1中可看出,长波红外探测器在阻抗为 1.5 MΩ 时,DI 结构的注入效率大于 73.6%,可以满足长波应用要求。

### 2.2 列级电路与输出级

列级电路主要完成电荷信号到电压信号的转换,在行控制信号的控制下将每行的像素收集的电荷信号逐列传输到相应的列级电容跨导放大器上,完成电荷电压信号转换,列电路设计有多档增益可调功能,如图3所示。

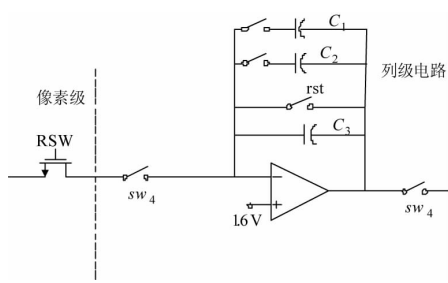


图 3 列级电路

Fig. 3 Line processing circuit

列处理电路采用两路处理电路,分别对奇偶两行的信号进行传输放大和读出处理。这样可以在不影响读出速度的情况下,减小输出信号对列运算放大器工作速度和带宽的要求,并节省功耗。

图 4 所示列运放使用优化设计的经典五管运放结构,达到降低整个列级电路的噪声和功耗目的,偏置电压在电路内部产生,可以降低外部干扰使运放稳定工作。

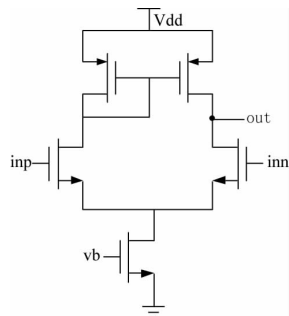


图 4 列运放电路

Fig. 4 Line operational amplifier

输出级电路设计有 4、8、16 通道可选功能,列级电路采用了分块处理方式,对应 16 路输出,将 1024 列分成了 16 块,每一块都有独立的数字控制电路,图 5 为输出级电路的结构示意图。分块设计的优点是每通道输出信号在版图设计时全部就近处理,缩短了走线长度,避免信号间的寄生串扰,有效控制了版图寄生带来的影响<sup>[5]</sup>。

输出通道数由数字电路控制开关切换,输出级对不用的通道做了隔离处理,极大地减轻了通道上的输出负载,保证了不同输出通道时具有同样的读出速率。

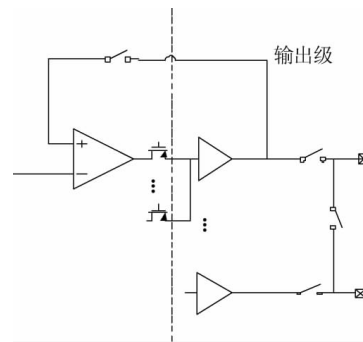


图 5 输出级电路

Fig. 5 The circuit of output stage

### 2.3 数字控制电路

数字控制电路完成时序控制功能,包括行译码、列译码、复位、信号转移、增益可选、4/8/16 输出通道可选等功能,数字电路设计时预留了部分数字脉冲测试管脚。图 6 给出的是设计时序仿真图。

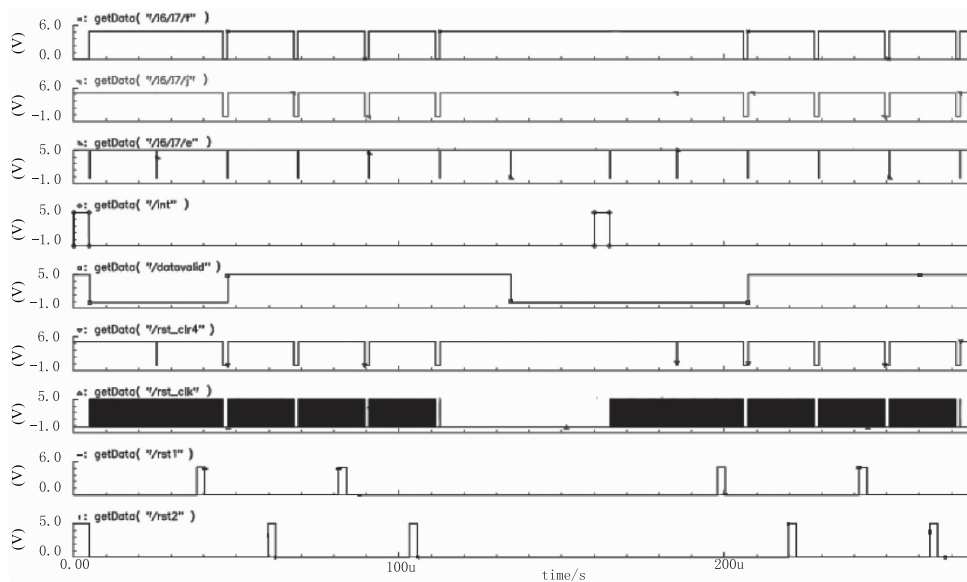


图 6 数字时序仿真图

Fig. 6 Timing diagram of digital circuit by simulation

### 2.4 电路仿真

电路设计最后将整个电路,包括数字电路、模拟电路以及外部接口做一个全电路的仿真,验证连接关系的正确性,验证电路的所有功能是否正确无误,

并对电路的读出速率、摆幅等性能做出分析。图7所示是相同仿真条件下对16通道和4通道的仿真输出,结果验证了读出电路设计功能正常,性能优良。



图7 电路仿真图

Fig.7 Simulation results of the circuit

### 3 电路测试分析

高光谱长波 1024 × 256 红外探测器读出电路已经基于 SMIC 0.35 μm 5.0 V 工艺完成了流片验证,目前对电路的功能及性能进行了测试分析。电路具有 4/8/16 通道切换功能,每种方式的读出速率具有一致性,达到 6 MHz ~ 8 MHz,输出摆幅 1.51 ~ 4.7 V,在此范围内线性度为 99 %,输出信号线性度仿真如图 8 所示,电荷最大处理能力达到 36 Me<sup>-</sup>。

纹清晰,结果显示读出电路工作状态稳定,性能良好。

表2 四档增益电路性能

Tab.2 Circuit performance of four gains

增益	电荷处理能力/Me <sup>-</sup>	噪声电子数/e <sup>-</sup>	动态范围/dB
G <sub>1</sub>	4	1062	71
G <sub>2</sub>	12	1740	76
G <sub>3</sub>	28	3625	77
G <sub>4</sub>	36	4100	78

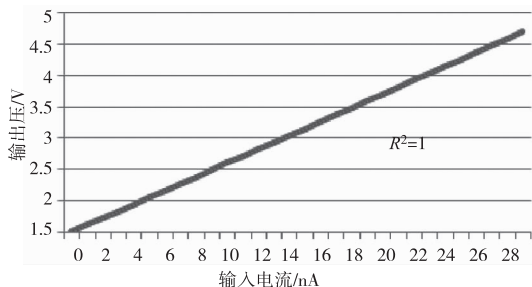


图8 输出信号线性度

Fig.8 Linear of output signal

电路具有增益切换功能,针对不同增益对噪声的测试结果见表2。

图9是互连后的探测器(试验片盲元较多)在35℃黑体下测试的电平灰度图,4通道输出,探测器底



图9 35 °C黑体测试的灰度图

Fig.9 Test gray-scale map in 35 °C blackbody

### 4 结论

本文介绍了高光谱长波 1024 × 256 红外探测器读出电路设计,对电路组成模块进行了介绍,对 DI 像素级注入效率进行了详细的分析描述,电路采用 SMIC 0.35 μm 5.0 V 工艺流片验证,经测试功能正常,性能优良,动态范围 > 71 dB,功耗 265 mW,摆幅达到 3.4 V,线性度 99.7 %,输出级满足 6 MHz ~ 8 MHz 的读出速率,最高帧频达到 250 Hz。

## 参考文献:

- [1] Bruno FIEQUE, Philippe CHORIER, Bertrand TERRIER. Sofradir detectors for hyperspectral applications from visible up to VLWIR [C]//Remone Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [2] P Mitra, J D Beck, M R Skokan, et al. SWIR hyperspectral detection with integrated HgCdTe detector and tunable MEMS filter[J]. Infrared Detector & Focal Plane Arrays VIII, 2006, 6295: 62950G – 62950G – 11.
- [3] Robert Sundberg, Alexander Berk, Steven Richtsmeier, et al. Hyperspectral scene simulation from the visible through the LWIR [C]//conference on Sensors, Systems and Next-Generation Satellites VIII 2004.
- [4] LI Jingguo, ZHUO Yi. Signal readout and processing technology of infrared focal plane array[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(4): 519 – 523. (in Chinese)  
李敬国, 卓毅. 红外焦平面信号读出及处理技术[J]. 激光与红外, 2018, 48(4): 519 – 523.
- [5] ZHUO Yi, YUE Dongqing, LI Jingguo, et al. A hyperspectral SWIR FPA ROIC design[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(11): 1382 – 1385. (in Chinese)  
卓毅, 岳冬青, 李敬国, 等. 短波高光谱红外焦平面系统电路设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 1382 – 1385.