

320×256 中/长波双色 IRFPAs 读出电路设计

周杰^{1,2}, 丁瑞军¹, 翟永成^{1,2}, 梁清华^{1,2}, 蒋大钊^{1,2}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中波与长波探测器的光电流及动态输出阻抗存在数量级的差别。为满足积分时间及读出信号信噪比的要求, 采用像元间多电容共享的方案, 设计了一种高集成度的 320×256 双色红外焦平面读出电路。该电路选用直接注入(DI)结构作为中波输入级, 而长波输入级则选用了缓冲注入(BDI)结构。其缓冲放大器采用单边结构, 具有高增益、低功耗、低噪声的特点, 降低了输入阻抗, 提高了注入效率。基于 HHNEC 0.35 μm 2P4M 标准 CMOS 工艺, 完成了芯片的设计与制造。经测试, 引入电容共享方案后其有效电荷容量达到 70 Me⁻¹/像元, 电路各项功能正常, 在光照条件下, 芯片呈现出高的灵敏性。在 2.5 MHz 读出速率下, 中波及长波输出电压范围均大于 2 V, 非线性小于 1%。在 100 f/s 帧频下, 整体功耗小于 170 mW。

关键词: 双色红外焦平面; 读出电路; 电容共享; 缓冲注入; 电荷容量

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2880-06

320×256 MW/ LW dual-color IRFPAs readout circuits

Zhou Jie^{1,2}, Ding Ruijun¹, Zhai Yongcheng^{1,2}, Liang Qinghua^{1,2}, Jiang Dazhao^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The photocurrent and dynamic output impedance of MW detectors differentiate from LW by several orders of magnitude. For the requirement in integrating time and readout SNR, a designing scheme of a highly integrated readout circuit for 320×256 dual-color infrared focal plane arrays(IRFPAs) was proposed by adopting a sharing methods between pixel capacitors. In this circuit, the DI structure was chosen as the MW injection stage and the BDI structure was used for LW. The buffered amplifier had a unilateral structure which always performed with high gain, low consumption and low noise, thus it reduced the input impedance and improved the injection efficiency. The chip was designed and manufactured based on HHNEC 0.35 μm 2P4M standard CMOS process. In the testing process, this chip presented a normal operating state and was sensitive enough to the change of illumination. The total effective charge capacity reached 70 Me⁻¹/pixel. Under 2.5 MHz output speed, the output swings of MW and LW were larger than 2 V and the nonlinearity less than 1%. The total power consumption was less than 170 mW when working with the frame rate of 100 f/s.

Key words: dual-color IRFPA; ROIC; sharing capacitor; BDI; charge capacity

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(6070612)

作者简介: 周杰(1988-), 男, 博士生, 主要从事红外焦平面读出电路设计方面的研究。Email: zheshengzhou143@126.com

导师简介: 丁瑞军(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事红外器件及集成电路研究、分析和评价等方面的研究。

Email: dingrj@mail.sitp.ac.cn

0 引言

随着第三代红外焦平面技术的不断发展,大面阵、高分辨率、多光谱焦平面集成技术已成为主流方向^[1-2]。自 20 世纪 80 年代以来,双色碲镉汞(HgCdTe)红外探测器以其材料本身的高量子效率、宽响应波长的特点以及双波段信息检测的优点,大大提高了系统的集成度、抗干扰能力以及对目标的识别能力^[3-5],因而成为了第三代红外焦平面探测器发展的主要方向之一。从读出模式上分,双色碲镉汞探测器可以分为顺序读出式和同时读出式两种。顺序读出探测器单元是由两个不同探测波长的探测器背靠背单层叠组成的,该种结构集成度高,读出结构简单,但两波段读出交替进行,存在较大的信号串扰。同时读出型探测器,则两不同波长探测器有单独的读出接口,能实现时间上的同步读出,且信号串扰小,但探测器相对复杂,集成度相对较低^[6]。图 1 为两种双色探测器结构示意图的比较。

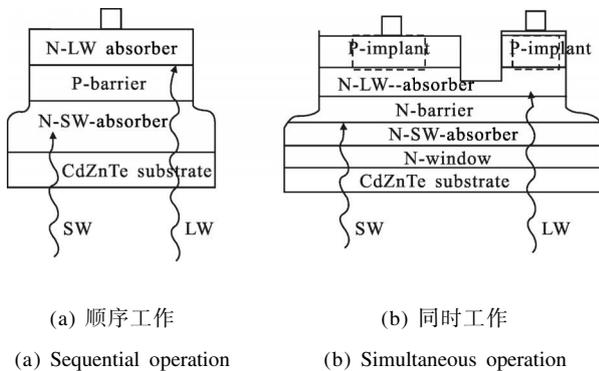


图 1 双色红外探测器结构示意图

Fig.1 Dual-color IR detector structure

探测器技术发展的同时,也给红外焦平面读出电路的设计提出了高效率、小像元面积、高帧频、低功耗、高信噪比的要求^[7]。文中给出了一种与同步读出型 320×256 中长波双色红外焦平面相适应的读出电路结构及其测试结果。该电路结构对双色信号均采用了边积分边读出(IWR)的信号输出模式,有利于提高读出帧频。在 50 μm×50 μm 的像元面积中,采用了改进的电容共享结构,利用积分过程中闲置的采样电容,将电荷容量提升至 70 Me⁻/像元,大大提高了单位像元内电路的集成度。同时,在无缓冲器的情况下,使采样电平信号得到无损的传递,降低了单

元电路的功耗。电路工作于 77 K 低温条件下,在功耗为 170 mW 的情况,可实现 100 f/s 视频输出,信号的非线性少于 1%。

1 整体结构设计

文中所设计的焦平面读出电路面阵匹配于 77 K 低温工作环境下的同时读出型双色红外探测器阵列。由于该种探测器中波、长波两波段输出阻抗及光电流在量级上相差较大(通常中波输出阻抗为 1 GΩ,光电流 10 pA,长波输出阻抗为 10 MΩ,光电流 10 nA),因而在给定的积分时间下,读出电路设计上需要在输入阻抗及积分电容上给出合理的匹配。

图 2 给出了该读出电路的整体框图,主要由像元级电路、列共用缓冲电路、视频输出驱动以及数字控制逻辑组成。模拟电路的性能直接影响了读出系统的功耗,动态范围,频响、线性度等特性。

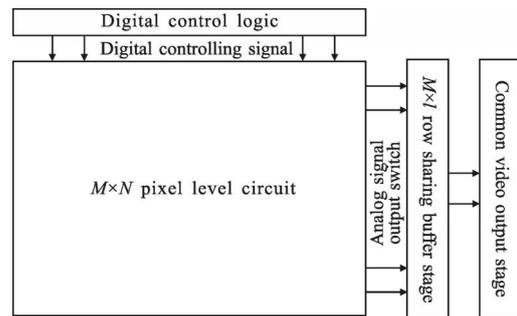


图 2 焦平面读出电路结构框图

Fig.2 FPA readout circuit structure diagram

图 3 为电路工作于 IWR 模式下的信号流程图。中、长波光电流在单元电路中同时开始积分,在给定的积分时间内完成积分,并在前一帧信号输出完成后,被存储在采样电容中。与此同时,存储于采样电容的前一帧信号电平通过列共用缓冲电路,最终在视频输出端输出。

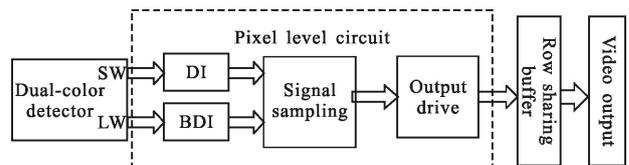


图 3 IWR 模式下信号流程图

Fig.3 Signal stream in IWR operating mode

2 读出电路设计与分析

在读出电路结构设计中,可按照信号流程图所示的顺序依次设计,包括像元级电路设计,信号传输链路设计以及视频缓冲输出级设计,并保证各级间电平及阻抗的匹配,以保证传输效率。其中,信号传输链路的性能一定程度上决定了信号输出过程中非线性失真以及信号输出摆幅的大小。对于中等规模面阵的读出电路,读出帧频以及芯片功耗,则基本取决于最后视频输出级的输出速率。而单元电路设计是读出电路设计的核心部份,其电路结构基本取决于探测器结构,而它也基本决定了整个电路的电荷容量、输出摆幅、信噪比等读出指标。

2.1 单元电路结构设计

像元级单元电路主要用于完成与探测器之间的阻抗匹配以及对光电流信号的转换,因而合理的输入阻抗、理想的电路噪声、较大的输出动态范围以及低功耗是该级电路设计中需考虑的设计指标^[6]。通常情况下,保证有效的积分时间或提高有效积分电荷容量,有利于提升单元电路信噪比。来自探测器的光子噪声是探测器所固有的噪声信号,在只考虑该噪声影响的前提下,焦平面的信噪比近似与积分时间的平方根成正比,可表述如下:

$$T_{\text{int}} = \frac{UC_{\text{int}}}{I_d} \quad (1)$$

$$\text{SNR} = \frac{I_d}{I_n} = \sqrt{\frac{I_d T_{\text{int}}}{q}} = \sqrt{\frac{UC_{\text{int}}}{q}} \quad (2)$$

式中: U 为积分电压; I_d 为探测器有效光电流; I_n 为光子噪声电流; T_{int} 为积分时间。

在有限的 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的单元面积内,设计足够的积分电容,以保证两个注入波段均有较高的光电流信噪比是相当困难的。图4给出了一种改进的像元级电路电容共享结构。为了提高像元面积利用率,该结构采用直接注入(DI)结构作为中波探测器的电流注入方式,而长波探测器由于其输出阻抗相对较低,则采用缓冲注入(BDI)的方式。如图4所示,两个行相邻单元的中长波积分电容 CIM、CIL 分别共享,同时,该结构在积分过程中将闲置的采样电容 CHM、CHL 共享至积分电容一起参与积分过程。通过上述两个过程的共享方式,该结构的积分电容扩展为单一单元的两倍以上,使电荷容量提升至 70 Me^- 。

当单元1处于积分阶段时,该单元占用所有的共享电容,中波及长波注入结构同时开始积分,同时,单元2采样电容保持上一帧积分信号等待读出。当读出完毕后,单元1的积分过程已经完毕,进入单元2积分、单元1读出的阶段。与单一像元内相比,两个波段的积分电容共享的方案^[7],该结构能够实现单元内中波和长波探测器的同时积分,使两波段的图像信号具有更强的同步性,有利于目标的识别。

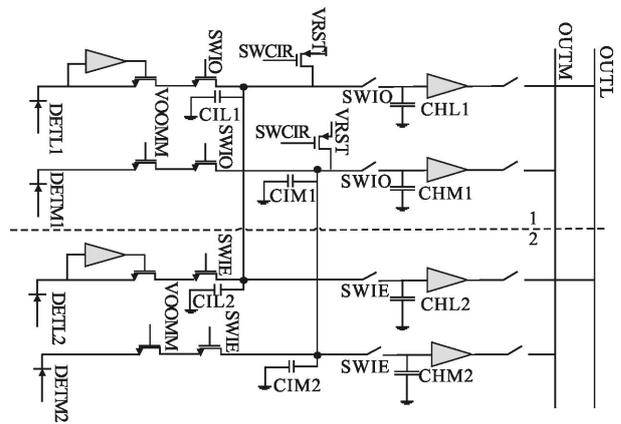


图4 像元级电路电容共享结构

Fig.4 Capacitance sharing structure in pixel level

2.2 缓冲注入级设计与分析

缓冲注入结构输入阻抗低,输出线性度良好,适用于输出阻抗较低的长波红外探测器。且当其稳定工作时,结构中的缓冲放大器所驱动的负载通常是较小尺寸的注入管的栅极,所需驱动的栅电容负载阻抗很大,不需要大的驱动电流,因而缓冲放大器的尺寸就能够尽可能地减小,适用于高集成度的读出电路结构设计,同时电路较小的静态工作电流满足了低功耗的设计要求。

图5(a)引入一种单边共源结构放大器,该结构主要由输入级和负载管组成。由于采用单边结构,放大器的静态功耗较差分输入结构降低了一半,同时减少了晶体管的数量,提升了集成度。

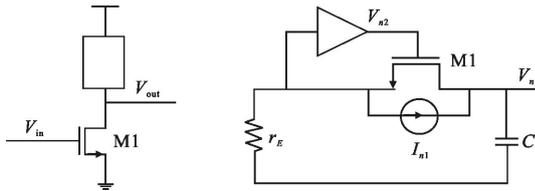
如图5(b)为缓冲注入结构输入级积分状态下的工作电路图,其中注入管噪声电流为 I_n ,缓冲放大器输出噪声为 V_{n2} ,探测器输出阻抗为 r_d ,则输出噪声电压由两部分组成,可表示为:

$$\overline{V_n^2} = \overline{V_{n1}^2} + \overline{V_{n2}^2} = \frac{\overline{I_n^2}}{1/r_o^2 + 4\Pi^2 C^2 f^2 [1 + r_d/r_o + A g_m r_d]^2} +$$

$$\frac{g_m \overline{V_n^2}}{1/r_o^2 + 4\Pi^2 C^2 f^2 [1+r_d/r_o + Ag_m r_d]^2} \quad (3)$$

式中: 晶体管 M1 的注入噪声电流为可表示为 $\overline{I_n^2} = \frac{8}{3}$

$kTg_m + \frac{K}{C_{ox}WLf}$; r_o 为注入管小信号输出阻抗^[8]。



(a) 单边共源结构放大器 (b) 含噪声源的 BDI 注入结构
(a) Unilateral amplifier (b) BDI structure with noise source

图 5 BDI 注入结构及其缓冲放大器
Fig.5 BDI structure and buffer amplifier

由于在正常工作状态下, $1/r_o^2 \gg 1$, 因而输出噪声电压可近似为:

$$\overline{V_n^2} = \overline{V_{n1}^2} + \overline{V_{n2}^2} \approx \frac{\overline{I_n^2}}{4\Pi^2 C^2 f^2 [1+r_d/r_o + Ag_m r_d]^2} + \frac{g_m \overline{V_n^2}}{4\Pi^2 C^2 f^2 [1+r_d/r_o + Ag_m r_d]^2} \quad (4)$$

由注入管本身引入的噪声 $\overline{V_{n1}^2} \propto \frac{\overline{I_n^2}}{g_m A^2 r_d^2}$, 通过

增加注入管的跨导 g_m , 可有效降低注入管自身的噪声。在给定的工作电流(探测器光电流)条件下, 需要适当增大注入管宽长比以增加注入管跨导。

由 DI 结构小信号电路图, 可计算其输出噪声电压, 如公式(5)所示。相比之下, 一个增益为 A 的缓冲放大器, 能将晶体管自身所引入的噪声电压抑制为原来的 $1/A^2$, 其代价是引入了缓冲放大器的输出噪声。

$$\overline{V_{n,DI}^2} \approx \frac{\overline{I_n^2}}{4\Pi^2 C^2 f^2 [1+r_d/r_o + g_m r_d]^2} \approx \frac{\overline{V_n^2}}{4\Pi^2 C^2 f^2 r_d^2} \quad (5)$$

注意到缓冲放大器所引起的输出噪声 $\overline{V_{n2}^2} \propto \frac{\overline{V_n^2}}{r_d^2} / A^2 \frac{\overline{V_{n,in}^2}}{r_d^2}$, 分子部分即为缓冲放大器的输入参考噪声电压。可见, 放大器的输入参考噪声电压直接作用于输出噪声电压上, 因而需要尽可能降低放大器

噪声特性。比较公式(5)所示 DI 结构的输出噪声电压, 为不降低 BDI 结构的噪声特性, 必须要求缓冲放大器的噪声特性不差于注入管噪声。

如果用 PMOS 作为图 5(a)所示共源级放大器的电流源负载, 则该结构总输入参考噪声电压可由下式给出:

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{8}{3} kT \left(\frac{g_{m2}}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m1}} \right) + \frac{1}{C_{ox}f} \left[\frac{K_R g_{m2}^2}{(WL)_2 g_{m1}^2} + \frac{K_N}{(WL)_1} \right] \quad (6)$$

第一项是由晶体管引入的热噪声, 增加输入管 M1 的跨导以及减少负载管 M2 的跨导都能有效降低输出噪声。而第二项是由晶体管闪烁噪声所引起的, 增加 M1 管跨导的方法在此依然有效, 同时, 考虑到 $g_{m2}^2 \propto \left(\frac{W}{L} \right)_2$, 增加 M2 沟道长度可以起到减小 M2 跨导的目的, 同时也降低了 M2 闪烁噪声对输入参考噪声的影响。

因而总体来说, 为减小缓冲放大器的输入参考噪声, 所设的共源缓冲放大器输入管应有较大的 W/L , 以满足 M1 跨导的要求, 同时, 尽可能增加负载管 M2 的沟道长度, 使 M2 近似于一个较理想的电流源负载。采用上述方法, 在满足了放大器噪声要求的同时, 也增加了放大器自身的增益, 满足了注入效率的要求。另外, 缓冲放大器增益的大小虽然不影响自身噪声特性对输出端的作用, 但能够有效降低注入管引起的输出噪声电压分量, 因而适当地增大缓冲放大器低频增益是必要的。为此, 引入共源共栅电流源结构作为缓冲放大器的负载。在该结构中, 共源共栅管对放大器输入参考噪声的贡献可以忽略不计, 但能有效提升放大器增益性能。

3 测试结果与分析

图 6 给出了 4×256 面阵中波及长波后仿结果。所设定的中波光电流在行的方向从 300~6 nA 之间均匀变化, 长波光电流则在 5~110 nA 的范围内均匀变化。这样的设置使得相邻的两个读出单元间信号呈现出大的电压跳变, 用以检验高速读出过程中读出通道的动态性能。图 6 分别给出了 64 个中波与长波读出数据点, 而每一波段数据又分为两组, 分别代表奇数行及偶数行的读出结果。由于采用按列读出的方式, 每次只读出两个相邻行的数据点, 其时间间隔为 0.4 μs, 即以 2.5 MHz 的速率输出。从仿真结果可见, 读出链路的有效输出范围为 1~3.8 V。读出信

号线性度良好,经计算其非线性度小于0.1%。

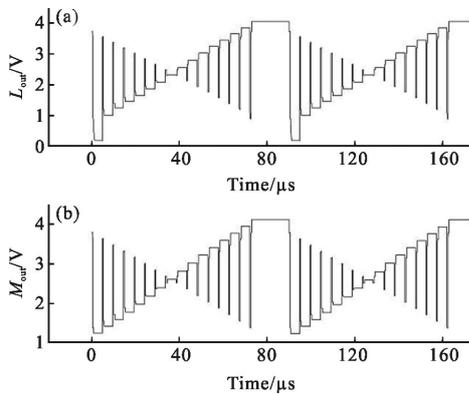


图 6 中波及长波 4×256 面阵后仿输出结果

Fig.6 4×256 FPAs post-simulation results of LW and MW

图 7 是 1×256 测试行在 2.5 MHz 传输速率下的光响应输出结果。当光照移动时,整个测试行表现出高度的灵敏性。读出链路的有效输出范围为 1.3~3.4 V。通过调节模拟探测器的光电流大小,可测得其非线性度小于 1%。

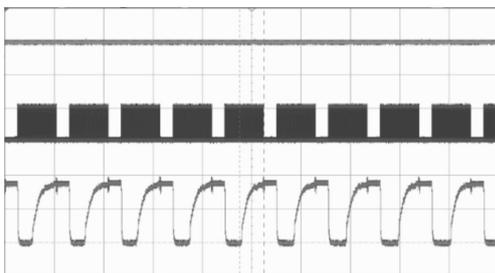


图 7 1×256 测试行光响应输出结果

Fig.7 Output results of 1×256 testing line

图 8 为整个焦平面读出电路在 100 f/s 帧频下的光响应结果,随着横向上光照强度的增加,输出电压从左至右逐渐下降。整个芯片在 20 f/s, 40 f/s, 80 f/s

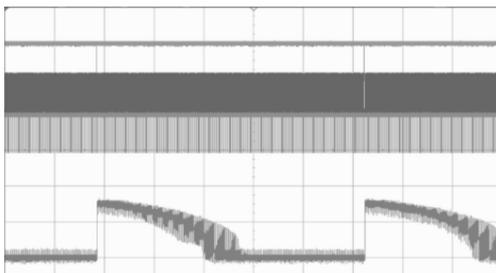


图 8 焦平面光响应输出结果

Fig.8 Photoresponse results of FPAs

条件下经过测试,均呈现出高度的灵敏性,其有效输出电压范围为 1.3~3.4 V, 输出信号噪声小于 1 mV, 整个芯片功耗小于 170 mW, 满足设计要求。

比较仿真与测试结果,在 2.5 MHz 的输出速率下,电路输出电压范围的上限减小了近 0.5 V。经测试,即使不进行任何积分过程而直接读出采样电容上电压值,上述现象依然存在。因此,这个电压降基本上是由传输链路中放大器饱和压降所引起的。通常一个跨导结构的输出级需要大的静态电流来满足驱动能力的要求,这就会增加负载管所需要的过驱动电压,使其具有更大的饱和压降。同时,这也会引起单位增益放大器的开环增益下降,从而导致其信号复制能力变差。表 1 给出了芯片主要性能与测试结果。

表 1 芯片主要性能与测试结果

Tab.1 Summary of chip performance

Performance	Results
Array size	320×256
Frame rate/ $f \cdot s^{-1}$	100
Supply voltage/V	5
Charge capacity/ $Me^{-} \cdot pixel^{-1}$	70
Output swing/V	>2
Output noise/mV	<1
Nonlinearity	$<1\%$
Operating temperature/K	77
Readout speed/ $MHz \cdot channel^{-1}$	2.5
Power consumption/mW	170

4 结论

文中设计了一种适用于同时读出模式的 320×256 中长波双色红外焦平面读出电路。根据中波及长波探测器光电流及输出动态阻抗的特点,该电路采用像元间积分电容及采样电容共享的电路结构,满足了积分时间及信噪比的要求,单一像元有效电荷容量达到了 $70 Me^{-}$ 。在长波注入结构中采用了高增益单边放大器作为缓冲放大器,具有低噪声、低功耗、稳定性好等特点,在满足注入效率的同时,提高了电路的集成度。电路整体功能正常,双波段注入效

率达到 90% 以上, 满足双色红外焦平面高帧频、低噪声、大摆幅、高线性度的要求。在后续的工作中, 将结合现有的双色红外探测器对本芯片作进一步性能上的评估。

参考文献:

- [1] Donald A Reago, Stuart Horn, James Campbell, et al. Third generation imaging sensor system concepts [C]//Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing X, 1999, 3701: 108–117.
- [2] Antoni Rogalski. Dual-band infrared focal plane arrays[C]//16th International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices, 2000, 4340: 1–14.
- [3] Ding Ruijun, Ye Zhenhua, Zhou Wenhong, et al. Review of two-color infrared focal plane arrays [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 14–17. (in Chinese)
丁瑞军, 叶振华, 周文洪, 等. 双色红外焦平面研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 14–17.
- [4] Ye Zhenhua, Li Yang, Hu Weida, et al. Simultaneous mode MW/LW two color HgCdTe infrared detector [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2012, 31(6): 497–500. (in Chinese)
叶振华, 李扬, 胡伟达, 等. 同时模式的中波/长波碲镉汞双色红外探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(6): 497–500.
- [5] Hsieh Chih-Cheng, Wu Chungyu, Sun Taiping, et al. A new cryogenic CMOS readout structure for infrared focal plane arrays[J]. *Journal of Solid Circuit*, 1997, 32(8): 1192–1199.
- [6] Asok sood, James Egerton, Yash Puri, et al. Design consideration of ROIC for single color LWIR and multicolor IR focal plane arrays [C]//Infrared and Phontoelectronic Imagers and Detector Devices II, 2006, 6249: 62490A.
- [7] Sun Taiping, Lu Yichuan, Shieh Hsiu Li, et al. Design of integrated readout circuit with enhanced capacitance mechanism for dual-band infrared detector [C]//Infrared Sensors Devices and Applications, 2011, 8155: 815505.
- [8] Behzad Razavi. Design of Analog CMOS Integrated Circuits [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.