

一种新的红外焦平面阵列调整电路设计

陈力颖^{1,2}, 于文阳^{1,2}, 任亚晶^{1,2}

(1. 天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387)

摘要:提出了一种新的红外焦平面阵列调整电路(skimming)设计。新的调整电路包括MEMS像元模块和非均匀性校正模块。该电路能够减少阈值电压对传统调整电路的影响,以及对探测器制造工艺引入的非均匀性进行补偿。MEMS像元模块通过控制明像元电路和盲像元电路中的电压值用于调节电路本身的非均匀性,同时非均匀性校正电路用以弥补探测器制造过程引入的像元电阻非均匀性。该电路应用于阵列为 640×480 的红外焦平面阵列上,采用TSMC 0.18 μm 工艺进行设计、仿真。仿真结果表明:MEMS像元模块能够使明像元电路和盲像元电路具有一致性;明像元电阻的非均匀性小于3%,最大积分电流失调为200 nA,非均匀性校正模块的补偿电流大于200 nA,符合设计要求,使得调整模块输出电流变大,积分电压变大,达到显示效果变亮的目的。

关键词:红外焦平面阵列;调整电路;MEMS像元;非均匀性

中图分类号:TN432 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.07.016

Design of skimming circuit for uncooled infrared detector

CHEN Li-ying^{1,2}, YU Wen-yang^{1,2}, REN Ya-jing^{1,2}

(1. School of Electronics & Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Photoelectric Detection Technology and System, Tianjin 300387, China)

Abstract: A new design of infrared focal plane array skimming circuit is proposed. The new skimming circuit includes pixel module and non-uniformity correction module. The circuit can reduce the influence of threshold voltage on the traditional skimming circuit and compensate the non-uniformity introduced by the detector manufacturing process. The pixel module is used to adjust the non-uniformity of the circuit itself by controlling the voltage values in the active pixel circuit and the blind pixel circuit, while the non-uniformity correction circuit is used to compensate for the non-uniformity of pixel resistance introduced by the detector manufacturing process. The circuit is applied to an uncooled infrared detector with an array of 640×480 , and is designed and simulated by TSMC 0.18 μm process. The simulation results show that the pixel module can make the active pixel circuit and the blind pixel circuit consistent. The non-uniformity of the active pixel resistance is less than 3%, the maximum integral current offset is 200 nA, and the compensation current of the non-uniformity correction module is greater than 200 nA, which meets the design requirements, so that the output current of the skimming module becomes larger, the integral voltage becomes larger, and the display effect becomes brighter.

Keywords: infrared focal plane array; skimming circuit; MEMS pixel; non-uniformity

1 引言

红外成像技术已经应用于许多领域,包括军事、交通、医学、工业等^[1]。微测辐射热计是红外成像

技术的关键部件之一。微测辐射热计是一种对红外辐射敏感的电阻传感器^[2]。当有红外辐射时,它会吸收红外辐射,引起电阻变化,电阻的变化会转换为

电信号。红外焦平面阵列读出电路的工作原理是通过检测微测辐射热计电阻变化,产生电流的变化,转化为电压信号进行输出。红外焦平面阵列读出电路的原理框图如图 1 所示。

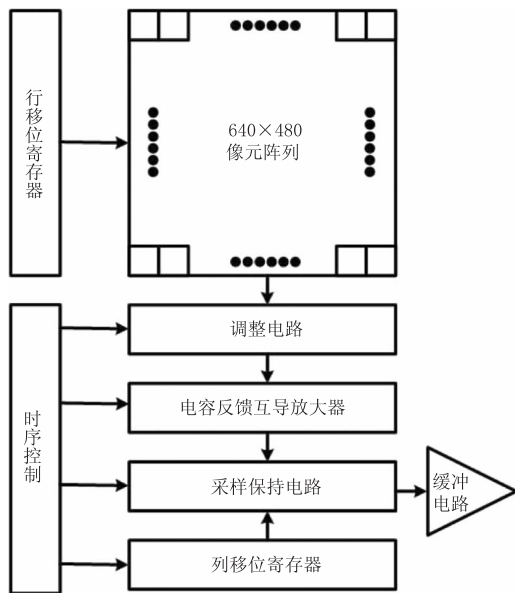


图 1 红外焦平面阵列读出电路的原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of the infrared focal plane array readout circuit

图 2 为传统红外焦平面阵列读出电路由传统调整电路和电容反馈互导放大器 (CTIA)^[3] 组成。在图 2 中,当栅极偏置电压 GSK 和 GFID 分别施加到 M1 和 M2 的栅极时, M1 和 M2 的源极电压变为 ‘GSK + |V_{thp}|’ 和 ‘GFID - V_{thn}’。其中, V_{thp} 和 V_{thn} 是 PMOS 和 NMOS 的阈值电压^[4]。图中有两个电阻: 明像元 R_a 和盲像元 R_b。通过吸收红外辐射,改变电阻值的是明像元。红外辐射对盲像元电阻值不会产生影响,用于参考电阻^[5]。i_a 是明像元支路电流值, i_b 是盲像元支路电流值, 输出电流 i_d 是 R_a 和 R_b 的函数, 可以表示为:

$$i_d = i_a - i_b = \frac{GFID - V_{thn}}{R_a} - \frac{VSK1 - GSK - |V_{thp}|}{R_b} \quad (1)$$

由公式(1)可以看出, i_d 是 V_{thp} 和 V_{thn} 的函数, 传统的调整电路中 i_d 对 V_{thp} 和 V_{thn} 的变化非常敏感。因为阈值电压会受到温度、源极电压和衬底电压等的影响, i_d 的输出将会受阈值电压变化的影响。新的调整电路将通过运算放大器控制明像元电阻和盲像元电阻两端电压值以减少 V_{th} 对 i_d 的影响, 用于调节电路本身的非均匀性。

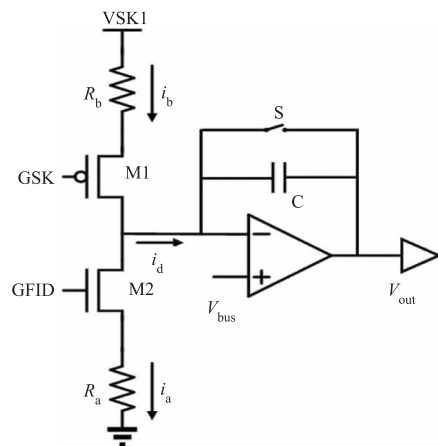


图 2 传统 skimming 模块与 CTIA 模块

Fig. 2 Traditional skimming module and CTIA module

另一方面, 在没有红外辐射时, 明像元电路和盲像元电路的输出信号应具有一致性^[6]。探测器制造工艺会引入一定的明像元电阻非均匀性, 非均匀性问题对系统的成像质量影响严重, 为了降低探测器电阻非均匀性对输出动态范围的影响, skimming 模块内集成了像元级非均匀性校正功能^[7]。非均匀性校正功能是通过在 VSK2 串联校正电阻来实现。

2 电路结构设计

加入新型调整电路的读出电路如图 3 所示, 该电路结构由非均匀性校正模块、MEMS 像元模块、电容反馈互导放大器组成。非均匀性校正模块通过弥补探测器制造过程引入的像元电阻非均匀性来提高调整电路输出电流精度, MEMS 像元模块通过运算放大器控制明像元电阻和盲像元电阻两端电压值以减少阈值电压对 i_d 的影响。电容反馈互导放大器将输出电流信号转化成电压信号进行输出。

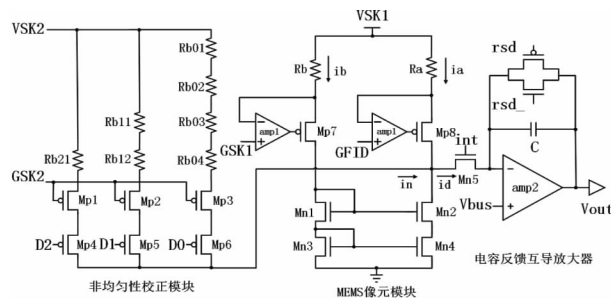


图 3 新型 skimming 模块与 CTIA 模块

Fig. 3 New skimming module and CTIA module

2.1 MEMS 像元模块

本论文中的红外像元指标如下:

- ◆像元有效吸收面积: $A = 17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$
- ◆ 640×480 像素焦平面阵列
- ◆ $R = 290 \text{ k}\Omega$, $\text{TCR} = -2.3 \%$, $C_{\text{int}} = 2.5 \text{ pF}$
- ◆电阻变化值: $-831.082 (-20 \text{ }^\circ\text{C})$
 $-1972.319 (27 \text{ }^\circ\text{C})$
 $-3942.637 (80 \text{ }^\circ\text{C})$

其工作原理为明像元吸收红外辐射后,因红外辐射加热使得温度发生变化,从而引起明像元 R_a 的电阻值变化,输出电流发生微弱变化^[8],输出微弱电流通过电容反馈互导放大器转换为电压值。

如图3所示,所提出的 MEMS 模块通过使用两个运算放大器来减少 V_{th} 的变化,调节运算放大器形成负反馈回路,负反馈回路将偏置电压 GSK1 和 GFID,施加到 R_a 和 R_b 两端。调节 GSK1 和 GFID 的值,改变明像元电路电流值 i_a 和盲像元电路电流值 i_b ,用于调节电路的非均匀性。同时使用由晶体管 Mn1, Mn2, Mn3, Mn4 组成的共源共栅电流镜,电流镜设计成宽长比大的晶体管,用来最小化噪声。共源共栅电流镜的作用是镜像盲像元支路电流值。使明像元上的支路电流与盲像元上的支路电流产生电流差,得到的输出电流信号 i_d 经过积分电路进行积分放大转化为电压信号。积分电流 i_d :

$$i_d = i_a - i_b = \frac{\text{VSK1} - \text{GFID}}{R_a} - \frac{\text{VSK1} - \text{GSK1}}{R_b} \quad (2)$$

由上式可知,输出电流信号只受 VSK1、GFID、GSK1 的电压值以及明像元和盲像元电阻值的影响,不受 V_{th} 的影响,所以新的调整电路可以减少阈值电压对输出信号的影响,调节电路的非均匀性。

假设在一个积分时间 t 内,输入电流 i_d 是定值,运算放大器的开环增益为无穷大,则输出电压为:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{bus}} - \frac{i_d \times t}{C_{\text{int}}} \quad (3)$$

2.2 非均匀性校正电路

理想情况下,红外焦平面阵列的所有明像元响应曲线都是同样的^[9]。非均匀性指的是红外探测器自身的材料、工艺上的缺陷等都会造成各个明像元具有不同的响应特性,即在同样的红外辐射下各探测元的响应输出不同^[10]。非均匀性校正电路的作用就是为了降低制造工艺等引入探测器电阻非均匀性对输出动态范围的影响^[11]。

每列由 D0 ~ D2 信号控制,芯片内共有 $3 \times 640 = 1920$ 根信号。从 MEMS 性能可以看出,在目标温度范围内,电阻的相对变化之差为 3.11 K (1.07%),信号电压的动态范围为 $0.5 \sim 4 \text{ V}$,考虑到其他因素的非均匀性,电阻的非均匀性小于 3% (8.7 K),其引起的最大积分电流达到 200 nA ,通过调节 GSK2 使得最大调整电流需大于 200 nA 。在偏压 VSK2, GSK2 和数字信号 D0, D1, D2 的作用下,输出调整电流。GSK2 用于调节调整电流, D0 输出支路的调整电流为:

$$i \approx \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} (|\text{GSK2} - V_x| - |V_{\text{thp}}|)^2 \quad (4)$$

其中 V_x 的值为:

$$V_x = \text{VSK2} - i \times 4R_b \quad (5)$$

同理可以根据上述公式可以计算出 D1、D2 输出支路的电流值。

非均匀性校正电路的电阻阻值与盲像元电阻 R_b 相同,电流成比例关系分别为 $i, 2i, 4i$ 。假设盲像元电阻远远大于 MOS 管的输出电阻,调整电流 i :

$$i = \frac{\text{VSK2} - V_{\text{bus}}}{4R_b} \quad (6)$$

调整电流 $2i$:

$$2i = \frac{\text{VSK2} - V_{\text{bus}}}{2R_b} \quad (7)$$

调整电流 $4i$:

$$4i = \frac{\text{VSK2} - V_{\text{bus}}}{R_b} \quad (8)$$

输出电流 i_d :

$$i_d = i_a - i_b + i_n \quad (9)$$

3 仿真结果分析

该电路使用 Cadence ADE 软件,采用 TSMC $0.18 \mu\text{m}$ 工艺进行设计、仿真。在 MEMS 模块中,观察运放的偏置电压对明像元电路和盲像元电路的影响情况。在非均匀性校正电路中,测试对输出电流的补偿情况,最后将未加入非均匀性校正电路和加入非均匀性校正电路进行对比。

3.1 MEMS 模块

当电源电压 VSK 设置为 5 V , GSK1 的电压值设置为从 $0 \sim 5 \text{ V}$ 的变化量, V_{bus} 电压值设置为 2.5 V , 盲像元电阻值不改变的情况下,盲像元支路电流值的变化量。盲像元支路电流值随 GSK1 电压值变化的仿真结果如图4所示。

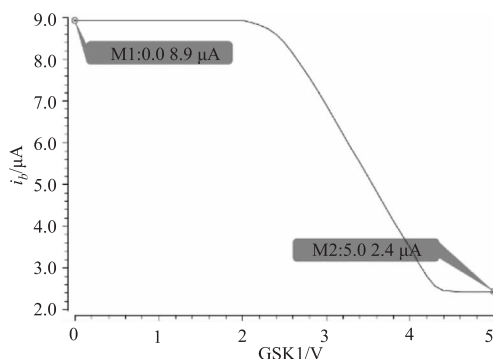


图4 盲像元电路随 GSK1 变化的仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of blind pixel circuit with GSK1 variation

由图4可知,盲像元电路的电流值(0~8.9 μA)随 GSK1 的电压值(0~5 V)的增大而减小。当电源电压 VSK 设置为 5 V, Vbus 电压值设置为 2.5 V, GFID 的电压值设置为从 0~5 V 的变化量,明像元电阻值不改变的情况下,明像元支路电流值的变化量。明像元支路电流值随 GFID 电压值变化的仿真结果如图5所示。

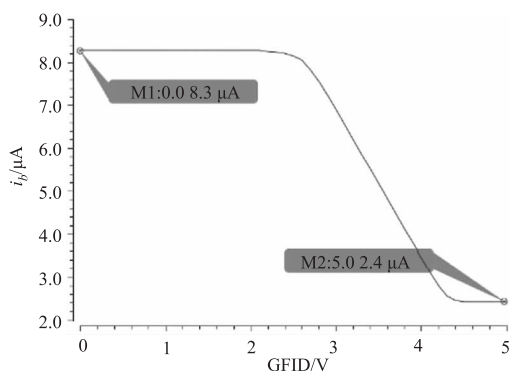


图5 明像元电路随 GFID 变化的仿真图

Fig. 5 simulation diagram of bright pixel circuit changing with GFID

由图5可知,明像元电路的电流值(0~8.3 μA)随 GFID 的电压值(0~5 V)的增大而减小。由图4、5可知,可以通过控制 GSK1 和 GFID 的电压值,改变盲像元电路电流与明像元电路电流,用于调节电路的非均匀性,达到输出电流变小,积分电压变小,显示效果变暗,一致性好的目的。

3.2 非均匀性校正模块

在非均匀校正电路中,当偏置电压 VSK2 设置为 3 V,偏置电压 GFID 的值设置为 2.33 V, Vbus 设置为 2.5 V,以及数字开关 D0、D1、D2 全部在闭合状态,D0、D1、D2 所控制的各个支路输出电流值以及总电流值如图6所示。

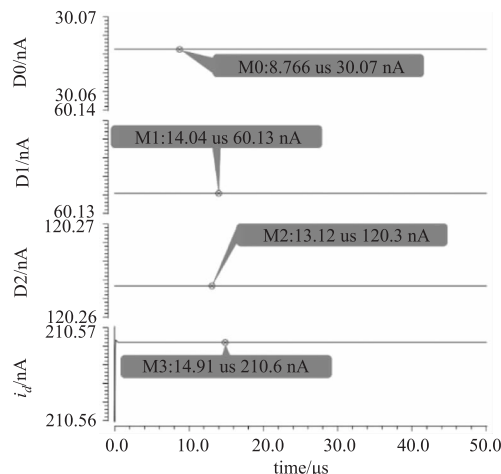


图6 D0、D1、D2 所控制支路电流的比例关系

Fig. 6 Proportional relation of branch

currents controlled by D0, D1 and D2

图6为瞬态仿真,表示由 D0、D1、D2 控制的支路电流值分别为 30.07 nA, 60.13 nA, 120 nA, 以及总的输出电流值 210.61 nA, 输出总电流值大于 200 nA, 可以弥补工艺偏差。由图6可知,电流值 D0、D1、D2 各个支路输出电流值成比例关系为 1:2:4, 与公式推导相同。

在非均匀性校正电路中,当偏置电压 VSK2 设置为 3 V,偏置电压 GFID 的值设置为 2.33 V, Vbus 设置为 2.5 V, 以及数字开关 D0 在闭合状态, D0 所控制支路输出电流值随电压值 GSK2 的变化,如图7所示。

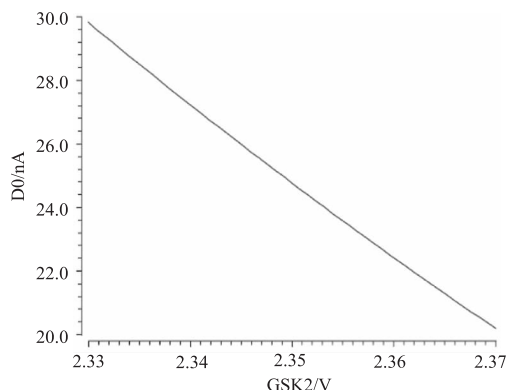


图7 D0 所控制支路输出电流值与电压值 GSK2 的关系

Fig. 7 relationship between output current value and voltage value GSK2 of branch controlled by D0

图7中横坐标为偏置电压 GSK2 的值,纵坐标为 D0 所控制支路电流值。由图7可知输出电流值随着 GSK2 的增加而减小, GSK2 平均每调节 40 mV 变化 10 nA 的电流,变化率约为 0.25 nA/mV。通过图7可知可以通过调节 GSK2 的值调节 D0 输出支

路电流的值,同理通过调节 GSK2 的值可以调节 D1、D2 输出支路的电流值,并且 D1、D2 输出支路电流值是 D0 输出支路电流值的倍数。通过控制数字开关 D0、D1、D2,改变总的非均匀性补偿输出电流值。以达到增加调整电路输出电流的目的。

当偏置电压 VSK1 设置为 5 V, Vbus 设置为 2.5 V,以及数字开关 D0、D1、D2 在断开状态,即无非均匀性校正电路。int 为高电平,rsd 为低电平,即 CTIA 为积分状态时,输出电流和输出电压的情况如图 8 所示。

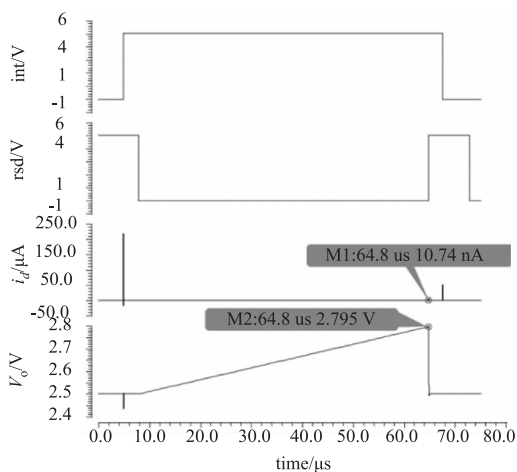


图 8 无非均匀性校正电路的输出结果

Fig. 8 Shows the output result of the non-uniformity correction circuit

图 8 为瞬态仿真,在 int 为高电平,rsd 为低电平,即 CTIA 为积分状态时,在没有加入非均匀性校正电路的情况下,调整电路的输出电流值 $i_d = 10.74 \text{ nA}$,积分电路输出的电压值 $V_o = 2.795 \text{ V}$ 。当偏置电压 VSK1 设置为 5 V,VSK2 设置为 3 V,GFID 的值设置为 2.33 V,Vbus 设置为 2.5 V,以及数字开关 D0 闭合状态,即加入非均匀性校正电路,CTIA 为积分状态时,输出电流和输出电压的情况如图 9 所示。

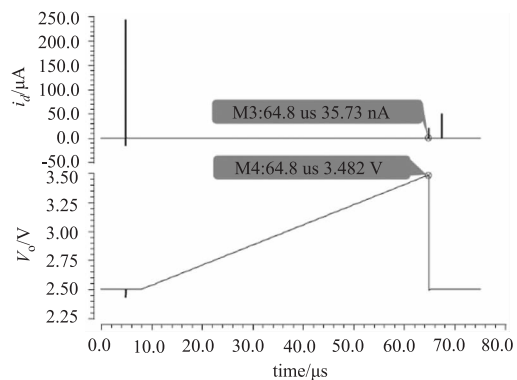


图 9 有非均匀性校正电路的输出结果

Fig. 9 Shows the output result of the non-uniformity correction circuit

图 9 同样为瞬态仿真,与图 8 的区别在于,图 9 的仿真结果加上非均匀性校正电路,调整电路的输出电流 $i_d = 35.73 \text{ nA}$,积分电路的输出电压值 $V_o = 3.482 \text{ V}$ 。

基于 TSMC0.18 μm 工艺,在 CTIA 为积分状态,图 9 中调整电路的输出电流值 i_d 明显增大,导致 CTIA 输出电压值明显增大。由图 8 和图 9 可知,在调节非均匀性校正过程中,调整电路输出电流变大,电容反馈互导放大器电路输出电压变大,显示效果变亮。

4 结 论

由于传统调整电路的输出信号会受阈值电压的影响和一定的像素电阻非均匀性的影响^[12],本文设计了一种新的红外焦平面阵列调整电路结构。该调整电路的 MEMS 像元模块通过新的电路结构设计使明像元与盲像元一致性好。非均匀性校正电路,使 MEMS 像元输出电流变大,进而积分电压变大,达到显示效果变亮的目的。

参考文献:

- [1] Shi Hairan, Li Zhaolong, Shen Tongsheng. Study on the correction method of non-uniformity of infrared focal plane array[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 204-208. (in Chinese)
史浩然, 李召龙, 沈同圣. 红外焦平面阵列非均匀性的校正方法研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 204-208.
- [2] Dai Shanbiao, Chenliying, Xing Haiying, et al. Equivalent pixel circuit design for infrared focal plane array[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 171-175. (in Chinese)
戴山彪, 陈力颖, 邢海英, 等. 用于红外焦平面阵列的等效像元电路设计[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 171-175.
- [3] Zhai Longchen, Lv Jian, Wei Linhai, et al. An infrared readout circuit with on-chip compensation function[J]. Infrared Technology, 2015, 37(2): 101-104. (in Chinese)
阙隆成, 吕坚, 魏林海, 等. 一种具有片上补偿功能的红外读出电路[J]. 红外技术, 2015, 37(2): 101-104.
- [4] Jindeok Seo, Gyungtae Kim, Kyomuk Lim, et al. An analog front-end IC with regulated R-I amplifier and CDS CTIA for microbolometer[J]. Control Automation and Systems (ICCAS), 2013: 1312-1315.
- [5] Zhao G Y, Ye M, Hu K, et al. A ROIC for diode uncooled

- IRFPA with hybrid non-uniformity compensation technique [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18 (2): 501–507.
- [6] Zhou T, He Y, Zhao J, et al. A low noise high uniformity readout circuit for uncooled infrared focal plane array[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 261–268. (in Chinese)
周同, 何勇, 赵健, 等. 一种用于非制冷红外焦平面阵列的低噪声高均匀性读出电路[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(3): 261–268.
- [7] Yuan H H, Chen Y P. Non-uniformity study on readout circuit for uncooled IR detector[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 4(11): 422–429.
- [8] Yuan H H, Chen S J, Zhai H M, et al. Design and implementation of a high-performance readout circuit for uncooled infrared detector[C]. Beijing: Applied Optics and Photonics China, 2015.
- [9] Zhong Y P, Yuan H H, Ju G H. Design of ROIC for long wave photoconductive detector with nonuniformity correction[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 117–122.
- [10] Pekarek, Prokop R, Svatos V, et al. Self-compensating method for bolometer IR focal plane array[J]. Sensors and Actuators A: physical, 2017, 265: 4046.
- [11] Jiang T, Li S, Gao S G, et al. Design of low noise preamplifier circuit for infrared detector[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(7): 913–918. (in Chinese)
江婷, 李胜, 高闽光, 等. 红外探测器的低噪声前置放大电路设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 913–918.
- [12] Xu M L, Wang H B, Li J. Infrared imaging temperature compensation method without TEC refrigeration circuit [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(9): 1132–1136. (in Chinese)
徐梦龙, 王玮冰, 李佳. 无TEC制冷电路下的红外成像温度补偿方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(9): 1132–1136.