光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250325002

基于光频转换实现室温中波碲镉汞探测器大动态范围读出

余双洋[1,2]，马 丁[2]，李向阳[2*]

（1. 上海大学 微电子学院，上海 201800；2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083）

摘 要： 室温工作的中波红外碲镉汞探测器因阻抗低、背景电流大，导致信号读出时信噪比和动态范围受限，影响其室温应用效果。针对该问题，文章设计一种光频转换电路结构。该电路利用低失调运放稳定探测器工作状态，再对探测器的光电流进行电流-电压-电流-频率的转换，将较大的光电流压缩至符合电流频率输入级的范围（0～4.3 μA），同时该电路也能有效抑制探测器暗电流和背景电流。测试结果表明，电路在与探测器结合后动态范围可达93 dB，电路功耗仅为27.3 mW，实现了中波红外碲镉汞探测器的室温大动态范围信号读出。

关键词： 碲镉汞探测器；室温；读出电路；光频转换；大动态范围

中图分类号： TN215 **文章编号：** 1001－5868(2025)03－0438－06

Large-Dynamic-Range Readout for Room-Temperature Mid-Wave HgCdTe Detectors Using Light-to-Frequency Converters

YU Shuangyang[1,2], MA Ding[2], LI Xiangyang[2]

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN; 2. Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: Mid-wave infrared (MWIR) HgCdTe detectors operating at room temperature face challenges in enhancing signal-to-noise ratio (SNR) and dynamic range during signal readout owing to their low impedance and high background currents, which limit their practical applicability under noncooled conditions. This paper presents a light-to-frequency converter circuit architecture designed to address these limitations. The proposed circuit stabilizes the detector's operating state using a low-offset operational amplifier and employs a current-to-voltage-to-current-to-frequency conversion process to reduce the high photocurrent into a range suitable for the current - frequency input stage (0 to 4.3 μA). Additionally, the circuit effectively suppresses dark and background currents originating from the detector. Experimental results demonstrate that the integrated system achieves a dynamic range of 93 dB with a power consumption of only 27.3 mW, enabling room-temperature, large-dynamic-range readout for MWIR HgCdTe detectors.

Key words: HgCdTe detector; room temperature; readout circuit; light-to-frequency converter; large dynamic range

0 引言

随着红外技术的不断发展，以碲镉汞材料为主的红外探测器性能不断优化，在安防、医疗、科研以及环境监测等多个领域发挥重要作用[1-2]。面对日

收稿日期：2025－03－25.

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF0721800）.

* 通信作者：李向阳

益复杂的探测环境，探测器微弱信号的读出常伴随着强干扰和高背景等，这对与探测器互连的读出电路性能提出了更高的要求。红外探测器读出电路的发展方向主要是高度集成、低噪声、低功耗、可调背景抑制、高灵敏度和大动态范围等，其中动态范围越大代表电路能够包含越多有用的信息，灵敏度越高表明电路对信息的分辨能力越强[3-4]。

目前实现微弱信号测量的方法主要包含两种：一种是将模拟电流转化为模拟电压，再通过ADC等模块转化为数字信号记录；另一种是直接将模拟电流转换为数字信号[5-6]。微弱信号的读出常使用电流电压转换法，但由于电源电压、噪声水平、积分电容、积分时间等因素的限制，红外探测器读出系统的动态范围主要受到电路限制，常用的标准CMOS工艺下电路输出电压摆幅一般不超过3 V，动态范围一般小于80 dB，读出电路的动态范围难以达到探测器芯片约120 dB动态范围的等级[7-8]。于得福等设计一种根据光照强度自动调节增益的CMOS探测器，通过电流增益的改变提高输入级动态范围，但该方法容易存在结构复杂、挡位切换点信号不连续等问题[9]。将模拟电流转化为数字信号以实现微弱信号读出的方法，其原理是通过将电流转化为频率输出，既能兼顾大动态范围和高灵敏度，又能够避免*I*-*V*转换法中模拟电压测量精度低的问题。国内已有一些基于数字化方案对红外探测器实现大动态范围读出的研究。于善哲等提出一种适用于中波红外成像低功耗数字读出电路，测试结果表明其信噪比为84 dB[10]。陈楠等采用脉冲频率调制方案设计了两款数字像元读出电路，耦合低温碲镉汞探测器组件后进行测试，电路动态范围达到96 dB，有效提高了红外探测器读出系统性能[11]。探测器读出电路一般需要复杂的制冷设备以维持在低温下工作，但有些特殊应用需要探测器在室温环境下工作。室温下的中波光伏碲镉汞探测器结阻抗相较于低温下大幅降低，同时存在暗电流大、背景辐射强等问题，这些因素限制了读出系统的动态范围。

为适应探测器在室温下的工作需求，本文提出一种电流-电压-电流-频率转换的电路方案，搭建了验证电路，利用中波红外碲镉汞单元探测器进行测试实验，实测表明该电路能够在室温环境下对红外探测器实现大动态范围读出。

1　光频转换原理及探测器特性分析

1.1　光频转换读出原理

光频转换的本质是基于脉冲频率调制，又称为电流频率转换，电流频率转换电路通常由积分器、比较器、基准偏置源、振荡器等部分组成[12-14]，是利用输入信号的幅值变化来对输出脉冲频率进行调控的一种方法。

对于红外探测器读出电路，考虑其注入效率、噪声等因素，积分器结构通常采用电容反馈跨阻放大器（CTIA）结构[15]，输入电流则由红外探测器提供，称之为光频转换器，如图1所示。电路整体工作原理是光电二极管接收到光信号后转化为电流信号，光电流经过电容反馈跨阻放大（CTIA）器中反馈电容的积分将电流信号转化为电压信号，该积分电压与比较器的阈值电压V_{ref}比较后控制比较器状态翻转，比较器的输出状态控制振荡器电路的信号状态，同时通过反馈回路控制积分泄放结构的开关，经过若干周期的积分和泄放得到50%占空比的方波[16-17]。电路输出的方波频率与光信号呈线性关系，因此方波频率大小代表了光信号的强度。电路输出频率与光强关系为：

$$I = R_{\mathrm{e}} \cdot P_{\mathrm{s}} \tag{1}$$

$$F = \frac{I_{\mathrm{ph}}}{(V_{\mathrm{BIAS}} - V_{\mathrm{REF}}) \cdot C_{\mathrm{int}}} \tag{2}$$

式中，P_{s}为光电二极管接收到的光功率，R_{e}为探测器光响应度，I_{ph}为光电二极管光电流，即光频芯片的输入电流，C_{int}为总积分电容。

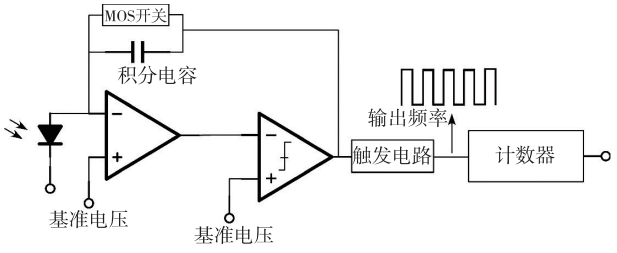


图1　CTIA输入级的电流频率转换结构

1.2　室温下探测器的特性

对于室温下的高饱和阈值中波红外碲镉汞探测器而言，其在高温环境或激光辐照下，探测器可能产生高达百微安的光电流，而其室温可探测电流下限由暗电流和环境辐照限制。对于响应波段在2～5 μm的中波红外探测器，光子通量密度为：

$$\Phi=\int_{2}^{5}\frac{2\cdot\pi\cdot h\cdot c^{2}}{\lambda^{5}}\cdot\frac{1}{h\cdot c/e^{\lambda\cdot k_{\mathrm{B}}\cdot T}-1}\mathrm{d}\lambda \tag{3}$$

式中，c为光速，T为温度300 K，h为普朗克常数，k_{B}为玻尔兹曼常数，则光伏型探测器受到波长λ为2～5 μm微分光子通量密度Φ的红外辐射产生的光电流为：

$$I=\frac{Q\cdot\eta\cdot\lambda}{h\cdot c}\cdot A\cdot\Phi=1.19\times10^{-7}\ \mathrm{A} \tag{4}$$

式中，Q为电子电荷，η为量子效率，A为光敏元面积。在无红外辐射条件下，器件的暗电流与室温环境耦合产生的总电流可达百纳安量级，极大限制了读出电路的动态范围。

另一方面，随着温度由低温升高到室温，载流子浓度大幅增加，暗电流增大，导致器件电阻率下降。探测器自身阻抗也由数十兆欧下降到200 Ω左右，这要求探测器的偏压趋近于零。探测器室温下的小偏压I-V测试如图2所示，反映了其对偏压的敏感程度，若要降低偏压带来的影响，需要探测器近似零偏。

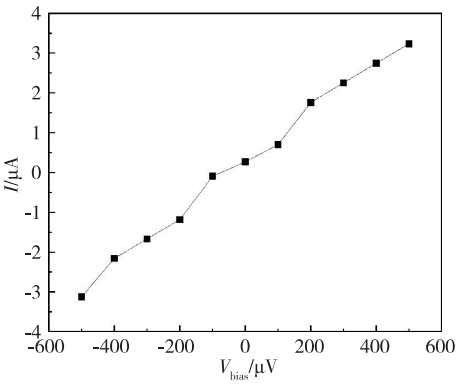


图2 红外探测器小偏压下的I-V曲线

2 电路结构设计

基于光频转换原理，设计室温红外探测器大动态范围电路结构如图3所示，电路系统包含低噪声基准源、光电二极管跨阻结构、电压-电流转换电阻、电压调整运放、电流-频率转换芯片、计数器等五部分。

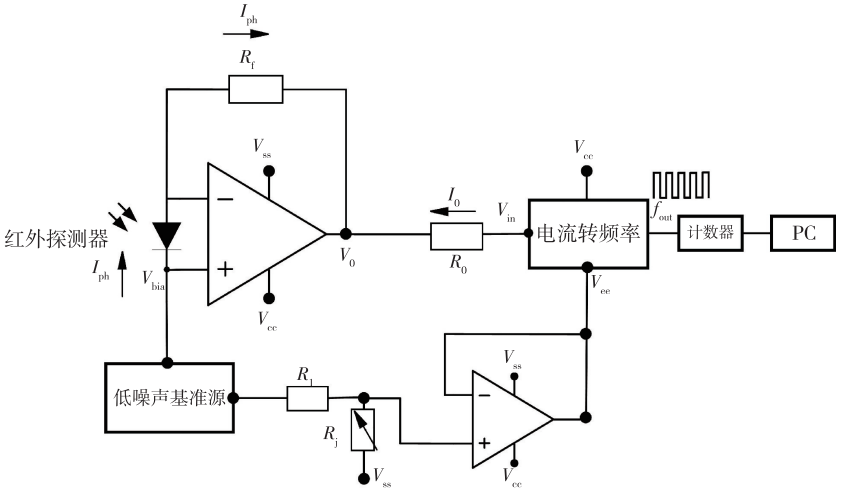


图3 光频转换电路整体结构图

低温下工作的碲镉汞红外探测器，其内部阻抗通常大于1 MΩ。考虑芯片内部噪声和芯片面积等因素，电流转频率芯片内部第一级CTIA运放一般不进行低失调设计，测试发现电流转频率芯片输入级CTIA运放输入失调偏大，约为5 mV。使用数字源表的电流源模式对电流转频率芯片进行测试，测试结果如图4所示，该芯片能将0～4.3 μA的输入电流转化为0～2.08 MHz的输出频率。对于本实验室自研的室温下表现为低阻抗的中波红外探测器，采用常规方法将其直接接入输入级并不可行，因为偏压会使探测器产生较大的电流。该电流会使电路转频率芯片的输出频率直接饱和，即满量程输出频率2.08 MHz，如图5所示。为克服电流转频率芯片输入级运放失调带来的影响，采用低失调低噪声的运放OPA189构成跨阻结构将探测器电流进行电流-电压-电流-频率转换。通过R_f反馈电阻将光电流转换为电压V_0，再通过电阻R_0将电压V_0转化为输入电流I_0，电流转频率芯片持续对I_0电流进行积分-复位，输出频率信号f_{out}。该方法能够降低运放失调和探测器背景电流导致的初始输出频率，也可以将探测器较大的光电流压缩至符合电流转频率芯片输入电流的范围。芯片输入端电流为：

$$I_0=\frac{V_{in}-\left(V_{bia}-I_{ph}\times R_f\right)}{R_0} \tag{5}$$

理论输出频率为：

$$f_{out}=\frac{V_{in}-\left(V_{bia}-I_{ph}\times R_f\right)}{R_0\times\left(V_{bia}-V_{ref}\right)\times C_{int}} \tag{6}$$

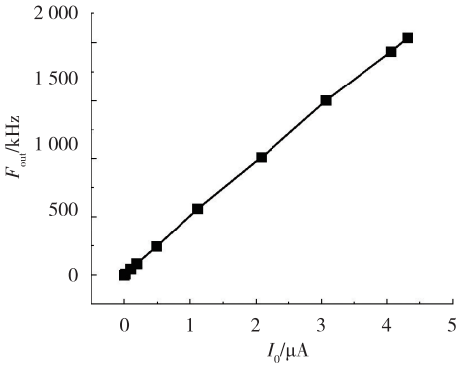


图 4　电流转频率芯片输入电流与输出频率测试图

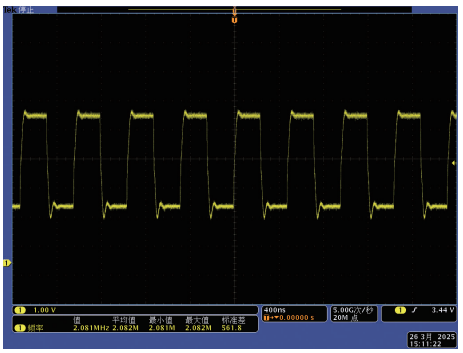


图 5　电流转频率芯片满量程输出频率

在该电路结构中，探测器通过低失调运放 OPA189 同反相端置零偏以最小化暗电流，运放采用斩波调零技术，能够使失调电压低至 10 μV 以内，降低偏置电压对探测器工作状态的影响。运放的失调电压测试电路如图 6 所示。将输入端短接后通过反馈回路的增益将失调放大，通过测试输出端电压得到失调电压大小。为降低输入偏置电流对失调电压的影响，电阻 R_1 和 R_2 选用相同阻值的小电阻 100 Ω，R_3 和 R_4 阻值选用 100 kΩ，以 1 001 倍的噪声增益放大输入失调电压，输出端使用高精度的数字源表测量输出电压并计算得到失调电压：

$$V_{out}=\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right)V_{os}=0.004\ \text{V} \tag{7}$$

$$V_{os}=\frac{V_{out}}{1\,001}=4\ \text{uV} \tag{8}$$

$$I=I_s\left(e^{\frac{V}{nV_T}}-1\right) \tag{9}$$

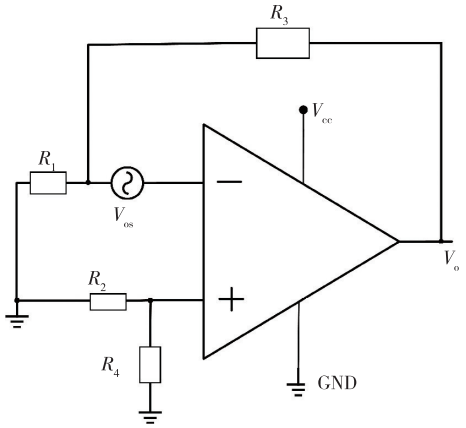


图 6　运放输入失调电压测试电路

由二极管的 I-V 特性可知，低失调运放的使用能够最大程度降低偏压对探测器的影响并且稳定探测器的工作状态。

由于电流转频率芯片输入级运放输入失调电压仍然存在，且探测器在室温下存在暗电流和背景电流，使得探测器室温工作时电路初始结点电压 V_{in} 大于 V_0，电路仍存在一个初始输出频率，显著降低了电路的动态范围。如图 7 所示为降低初始输出频率前后电路整体测试结果对比图。通过使用一个具有大输入电流能力的运放 OPA2310 对 V_{in} 进行分压调整，使其接近 V_0，从而使其初始频率低于 50 Hz，扩展了电路动态范围。此外，通过调整反馈电阻 R_f 和输入电阻 R_0 的值，可适应输入光电流 I_{ph} 的范围，极大提高了应用环境的灵活度。

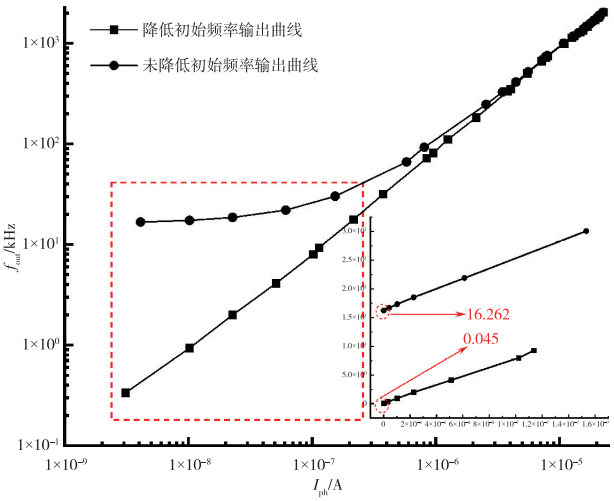


图 7　降低初始输出频率前后电路整体测试结果对比图

该电路利用电流-频率转换芯片将跨阻放大器的幅度域线性范围转化为时间域的动态调节（积分与泄放周期），从而在跨阻电路动态范围有限的情况下，实现更大的动态范围。

3 结果分析

使用树莓派pico单片机电路板板载计数器对频率信号进行采集计数，再通过电脑串口进行记录，结合公式(5)和(6)可知在该系统中光电流与输出的计数值之间的关系为：

$$N=\frac{T\times I_0}{C_{\text{int}}\times(V_{\text{in}}-V_{\text{ref}})}=\frac{T\times\left(V_{\text{in}}-V_{\text{bia}}+I_{\text{ph}}\times R_{\text{f}}\right)}{C_{\text{int}}\times(V_{\text{in}}-V_{\text{ref}})\times R_0} \tag{10}$$

对整体电路在室温环境下进行测试，测试结果如图8所示。频率信号通过16位计数器采集为数字码值，计数器门控周期为33 ms，采集结果为128次结果平均，该方法能在输出端进一步提高信号的信噪比。可以看出，在室温条件下未给探测器施加红外辐射时电路采集到的系统噪声位于1.38附近，随着红外辐射加强，电路最大计数值可达65 535。实验结果表明，这种光-电流-电压-电流-频率的光频转换读出方法能够对中波探测器在室温下进行大动态范围、高灵敏度读出，与探测器结合后，电路整体动态范围可达93 dB，电路整体采用0～5 V供电，不含采集板时前端电路功耗约为27.3 mW。

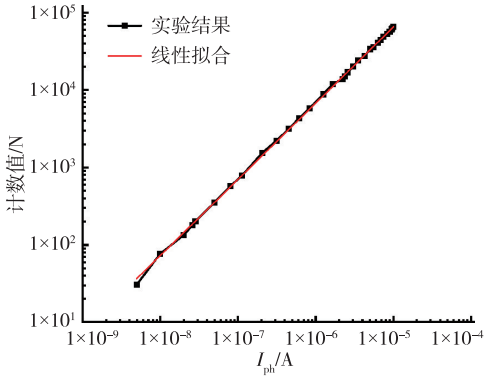


图8 光频转换电路数字量化测试结果

4 结论

本文针对室温环境下中波光伏碲镉汞探测器存在的暗电流和背景电流高，电流转频率芯片输入电流范围有限且不兼容低阻抗探测器等问题设计了一种电流-电压-电流-频率结构的读出电路。该电路利用低失调运放OPA189最小化探测器偏压并稳定其工作状态，通过电压调整运放OPA2310降低探测器暗电流、背景电流导致的电路初始输出频率和计数值，实现了对探测器背景电流和暗电流的抑制，提高了电路整体的动态范围。使用单元中波碲镉汞光伏探测器进行实验，结果表明，读出系统的功耗仅为27.3 mW，动态范围达到93 dB。该设计为室温环境下实现碲镉汞探测器大动态范围读出电路提供了一种方案。

参考文献：

[1] Argirusis N, Achilleos A, Alizadeh N, et al. IR sensors, related materials, and applications [J]. Sensors, 2025, 25(3): 673.

[2] Kopytko M, Sobieski J, Gawron W, et al. Study of HgCdTe (100) and HgCdTe (111) B heterostructures grown by MOCVD and their potential application to APDs operating in the IR range up to 8 μm[J]. Sensors, 2022, 22(3): 924.

[3] Zhao C, Zhang W, Yuan F, et al. Research progress on digital ROIC of infrared focal plane array detector[J]. Proc. SPIE, 2023: 129350C.

[4] Chen M, Liu Y, Li Z, et al. A high dynamic range CMOS readout chip for electrochemical sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(10): 3504-3513.

[5] 陈继明，陈煌伟，陈智峰，等. 中短波红外图像传感器读出电路研究进展[J]. 微电子学，2023，53(4)：707-715.
Chen Jiming, Chen Huangwei, Chen Zhifeng, et al. Research progress of readout circuits for MW/SWIR image sensors[J]. Microelectronics, 2023, 53(4): 707-715.

[6] 姜 羽，梁清华，卢 天，等. 双色红外焦平面数字读出电路研究[J]. 半导体光电，2024，45(3)：395-400.
Jiang Yu, Liang Qinghua, Lu Tian, et al. Research on digital readout circuits for dual-color infrared focal plane arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(3): 395-400.

[7] 白丕绩，姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. 红外技术，2015，37(2)：89-96.
Bai Piji, Yao Libin. Readout integrated circuit for third-generation infrared focal plane detector [J]. Infrared Technology, 2015, 37(2): 89-96.

[8] 汪鸿祎，张思韬，王绪泉，等. 一种单一增益下实现红外探测器大动态范围读出方法研究[J]. 红外与毫米波学报，2022，41(5)：923-929.
Wang Hongyi, Zhang Sitao, Wang Xuquan, et al. A study on a method to achieve large dynamic range readout of infrared detectors with a single gain [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(5): 923-929.

[9] 于得福，陈永平，李向阳. CMOS探测器自适应信号读出技术研究[J]. 半导体光电，2024，45(1)：36-41.
Yu Defu, Chen Yongping, Li Xiangyang. Adaptive signal readout technology for CMOS detectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 36-41.

[10] Yu S Z, Zhang Y C, Niu Y Z, et al. A 48 mW DROIC with 15-bit pixel-level ADC for 640×512 mid-wave infrared imagers[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022,

41(4)：785-791.

[11] 陈　楠，张济清，毛文彪，等. 大动态范围、高灵敏度红外焦平面数字像元读出电路技术(特邀)[J]. 红外与激光工程，2022，51(3)：21-31.
Chen Nan，Zhang Jiqing，Mao Wenbiao，et al. High-dynamic-range and high-sensitivity IRFPA digital-pixel ROIC technology (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51(3)：21-31.

[12] Awan M A，Ahmad K，Bermak A，et al. An asynchronous CMOS current readout with 124-dB dynamic range for bioluminescence sensing [J]. IEEE Solid-State Circuits Letters，2024，7：223-226.

[13] Di Patrizio Stanchieri G，De Marcellis A，Faccio M，et al. A fully integrated CMOS 0.3V_{335} nW PWM-based light-to-digital converter for optoelectronic sensing systems in biomedical applications[J]. IEEE Sensors Letters，2025，9(2)：3500404.

[14] Hidalgo-López J A. A simple front-end for pulse oximeters with a direct light-to-time-to-digital interface circuit [J]. IEEE Sensors Journal，2024，24(1)：346-354.

[15] 李毅强，吴治军，翟江皞，等. 一种单片集成式光-频率转换芯片[J]. 半导体光电，2019，40(3)：318-320.
Li Yiqiang，Wu Zhijun，Zhai Jianghao，et al. Design of monolithic integrated light-to-frequency chip [J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(3)：318-320.

[16] Tang F，Shu Z，Li M，et al. A low power and fast tracking light-to-frequency converter with adaptive power scaling for blood SpO $_2 $ sensing [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems，2019，13(1)：26-37.

[17] Correia R G，Pimenta S，Minas G. CMOS integrated photodetectors and light-to-frequency converters for spectrophotometric measurements[J]. IEEE Sensors Journal，2017，17(11)：3438-3445.

作者简介：

余双洋(1999—)，男，河南省商丘市人，硕士研究生，主要从事红外探测器读出电路方面的研究；

李向阳(1969—)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事窄禁带半导体红外探测器和宽禁带半导体紫外探测器等方面的研究。