

文章编号:1001-5078(2024)05-0746-04

· 红外材料与器件 ·

一款多色叠层量子阱红外探测器的读出电路设计

张露漩, 于艳, 李敬国

(中电科光电科技有限公司, 北京 100015)

摘要: 一款完整的红外焦平面探测器主要包含探测器件、读出电路、封装结构和制冷组件。目前根据不同应用场景,探测波段范围不断变宽、探测灵敏度需求提高、成像速度要求加快,对探测器设计提出了更严格、更复杂的指标要求。其中,读出电路将探测光信号转换为电信号传输至系统,是探测器组件的关键核心模块。本文设计了一款对应多色叠层量子阱型器件的红外焦平面探测器读出电路,能够实现同时间、同空间对四波段信号进行探测,并且同时读出,四波段信号的探测积分与读出之间没有互相干扰。探测器规格 640×512 ,像元间距 $50 \mu\text{m}$ (四波段),各波段信号可实现分时积分、分别可调,采用边积分边读出工作模式,读出帧频可达到四波段探测时 $\geq 50 \text{ Hz}$,电路噪声 $\leq 0.5 \text{ mV}$,动态范围 $\geq 70 \text{ dB}$,电功耗 $\leq 600 \text{ mW}$,是一款超大规模低噪声高帧频的高性能读出电路。

关键词: 多色;量子阱;红外探测器;读出电路

中图分类号:TN491;TN214 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.013

A read out circuit design of a multi-color stacked quantum well infrared detector

ZHANG Lu-xuan, YU Yan, LI Jing-guo

(CETC Electro-Optics Technology Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: A complete infrared detector consist a detection device, readout circuit, and package structure and refrigeration component. At present, according to different application scenarios, the detection band range is constantly widening, the detection sensitivity needs to be improved, and the imaging speed requirements are accelerated, which put forward stricter and more complex index requirements for detector design. Among them, the readout circuit converts the detection optical signal into an electrical signal for transmission to the system, and is the key core module of the detector component. In this paper, an infrared focal plane detector reading circuit corresponding to a multicolor laminated quantum well device is designed, which is capable of detecting four-band signals at the same time and read them out at the same time, and there is no mutual interference between the detecting integrals of the four-band signals and the readout. The detector specification is 640×512 , with a range of $50 \mu\text{m}$, the signal of each band can be achieved by time integration, respectively adjusted. Adopting the work mode of integrating while reading out, the readout frame frequency can reach $\geq 50 \text{ Hz}$ in four-band detection, the circuit noise $\leq 0.5 \text{ mV}$, the dynamic range $\geq 70 \text{ dB}$, power consumption $\leq 600 \text{ mW}$, which is an ultra-large-scale, low-noise, high-frame-frequency, high-performance readout circuits.

Keywords: multi-color; quantum well; infrared detector; readout circuit

1 引言

随着当前科技的快速发展,人们的生活日益向着智能化时代发展。其中,传感器支撑了智能化系统的感知和识别。对于光电传感器来说,对不同波段进行探测,就可以看到不同信息。红外探测器对红外波段的探测,可以让我们看到黑夜中的图像和温度分布,广泛应用于红外监控系统、火情预警、卫星探测等多种需求背景^[1]。

发展高性能的红外探测器,目前主流方向有:少光子、单光子、光子数可分辨的红外探测器;超大规模的红外焦平面阵列器件;多波段探测的光电器件;多波段融合的红外光电器件;新型读出方式的焦平面器件等^[2]。

本文针对中/长四波段叠层型量子阱红外探测器器件,设计了一款能够实现同时间、同空间对四波段信号进行探测,并且同时读出,四波段信号的探测积分与读出之间没有互相干扰的高性能读出电路。阵列规模大,正式像元数量达到 $640 \times 512 \times 4$ 个,像元间距 $50 \mu\text{m}$ 。探测读出速度快,四个波段信号分时积分、分别可调,采用边积分边读出工作模式,读出帧频可达到四波段探测时 $\geq 50 \text{ Hz}$ 。同时,电路性能稳定,在超低温工作环境下电路噪声 $\leq 0.5 \text{ mV}$,动态范围 $\geq 70 \text{ dB}$ 。为了提高探测器组件整体性能,降低系统负载,电功耗 $\leq 600 \text{ mW}$,满足集成化、小型化、智能化的发展趋势。

2 多色叠层量子阱型红外探测器器件

红外焦平面探测器目前的发展趋势是多色(或多波段)焦平面探测器,其探测数量已达到 1 k 、 4 k 、 8 k 级阵列规模,多色阵列列为单片二维结构,每个红外探测像素单元都由两个或多个相互重叠或相邻的光敏元构成^[3]。

本文探测器采用的是由 GaAs/AlGaAs 等 III-V 族材料制作的多色叠层型量子阱红外探测器器件(QWIP)^[4]。探测器结构示意图如图 1 所示。

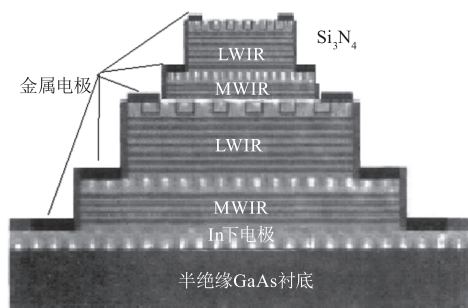


图1 探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detector structure

探测器阵列规格 640×512 , 像元间距 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 每个像素单元为可对中、长波四个波段光信号探测的器件结构,金属电极共五个。

3 四色红外探测器读出电路设计

3.1 架构设计

对于量子阱探测器读出电路设计与碲镉汞探测器读出电路设计不同,既需要为探测器件提供较高的工作偏置点,又需要能够处理较大的暗电流,保证足够宽的输出摆幅。而对于叠层四色量子阱器件,还需要考虑不同波段器件工作时的多个金属电极之间的偏压差,以此来确定工作波段。四色量子阱器件与电路互连示意图如图 2 所示。

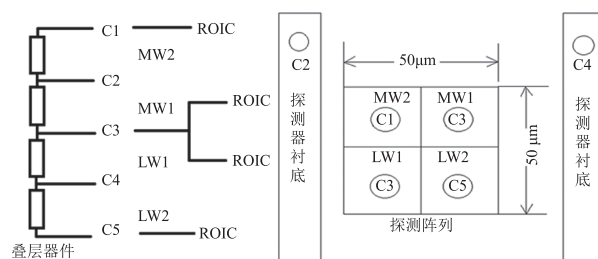


图2 四色量子阱器件电路互连示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circuit interconnections of four-color quantum well devices

根据以上器件特点,确定读出电路设计架构与工作方式。四色红外读出电路的设计,主要包含:(1)数字逻辑设计;(2)像素单元设计;(3)列采样缓冲模块设计;(4)高速输出级模块设计^[5]。读出电路架构框图如图 3 所示。中波两波段和长波两波段信号先后积分,分别可调,本帧积分结果在下一帧周期中读出,实现边积分变读出的工作模式。像素单元的积分结果通过上下共四组列采样缓冲模块输出至高速输出单元模块。数字逻辑单元仅需要外部输入的主时钟 MC 和 4 组积分控制信号 INTM1/INTM2/INTL1/INTL2,控制生成模拟像素级、列级、输出级的全部关键模拟信号。模拟偏置电压由内产生和外部输入同时控制可调。

3.2 数字逻辑设计

红外读出电路的芯片是数模混合电路,模拟单元电路完成探测中长波段信号的积分和传输,数字逻辑单元控制完成读出电路的积分、读出的关键时序工作。有序完成中长四个波段信号的探测和读出工作,积分信号控制分为 INTM1/INTM2/INTL1/INTL2 四组,在主时钟 MC 的上升沿有效,本帧内像素

单元的积分结果在下一帧传输至模拟列级,再经过输出级高速运放读出,实现边积分边读出的工作模式。时序如图 4 所示。

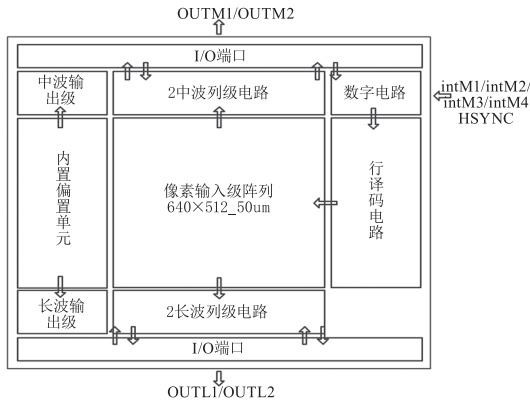


图 3 四色量子阱读出电路架构框图

Fig. 3 Block diagram of four-color quantum well readout circuit architecture

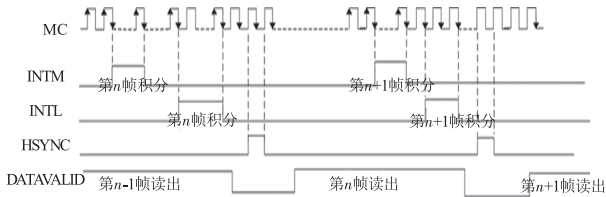


图 4 边积分边读出工作时序图

Fig. 4 Integrate as you read out the working timing diagram

3.3 输入级像素单元设计

针对中/长四波段同时探测、像素单元面积有限的红外探测器读出电路,输入级像素单元采用直接注入(DI, Direct Injection)的设计结构如图 5 所示,该结构方式简单、MOS 晶体管数量较少、面积占用较小,有利于设计得到更大的积分电容,从而处理尽可能大的电荷存储量,有利于提高电路的输出摆幅,抑制暗电流引起的输入级噪声。

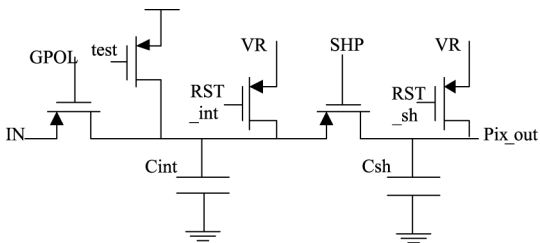


图 5 DI 型像素单元设计

Fig. 5 DI-type pixel cell design

针对四波段叠层量子阱型器件,输入级像素单元对应器件类型,设计中波两波段为 PonN 型,长波两波段为 NonP 型,探测工作时根据不同波段工作时序选通,不积分工作时,电荷存储在积分电容,传输至模拟列级采样缓冲单元,如图 6 所示。

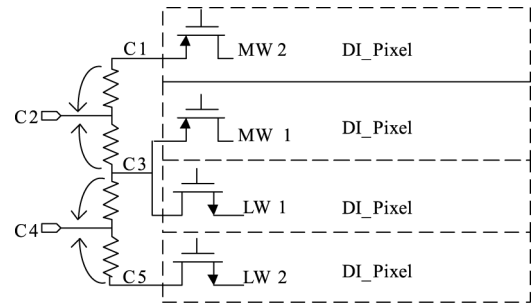


图 6 中长四色输入级电路

Fig. 6 Medium and long four-color input stage circuits

3.4 列采样缓冲单元设计

列采样缓冲单元完成输入级积分信号的采样和缓冲输出至输出级,由数字逻辑单元产生的时序控制,完成信号的采集和传输。

该单元包含电压采集预处理运放 AMP1 和输出缓冲运放 AMP2,完成将输入级像素单元内积分电压传输至输出级 OUT_AMP,每一列输入级对应一组列缓冲单元,传输速度要大于每一行所有列信号的建立时间,电压传输时的噪声、功耗和面积是设计重点,原理图如图 7 所示。

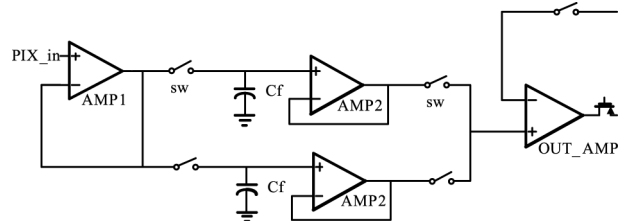


图 7 列处理电路原理图

Fig. 7 Column processing circuit schematic

通过电压传输的方式,能够实现 $(1.6 \sim 4.4 \text{ V}) \pm 0.1 \text{ V}$ 的输出摆幅。列级采样缓冲要求的工作频率不高,因此设计单个运放时将功耗设计尽量低,设计功耗值 $59 \mu\text{W}$,噪声 0.057 mV ,摆率 $2.5 \text{ V}/260 \text{ ns}$,相位裕度 79° ,增益 60 dB 。

3.5 高速输出级模块设计

高速输出级运放的工作性能关系到读出电路的信号读出速度,进而影响探测器工作帧频,同时,大带负载能力能够保证系统探测工作的大驱动力和信号传输的稳定性。本设计采用折叠共源共栅差分运放和甲乙类推挽反相运放级联构成,如图 8 所示。

在设计时,高增益大输出范围和高电流增益驱动大负载是设计重点。本文设计能够实现 $(1 \sim 4.9 \text{ V}) \pm 0.1 \text{ V}$ 的输出摆幅,噪声 0.104 mV ,摆率 $3.98 \text{ V}/12 \text{ ns}$,增益 88 dB ,相位裕度 86.3° ,单位增益带宽达到 117 MHz 以上,功耗 15 mW 。

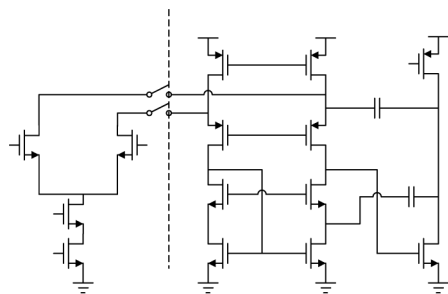


图8 折叠共源共栅输出级运放

Fig. 8 Folding common source and common gate output stage output amps

4 性能仿真结果

基于XFAB 0.35 μm 5 V STITCH CMOS工艺对所设计的多色量子阱红外探测器读出电路进行功能验证和性能仿真,主要包含数字逻辑时序功能仿真、模拟输入级、列级和输出级的输出范围、建立时间、线性度、噪声和功耗仿真。仿真结果如下图所示,本文设计读出电路能够实现四波段信号同时间、同空间进行探测和读出,四波段信号互不干扰,积分分别可调,边积分边读出工作,提高探测帧频。详细性能仿真结果如表1及图9所示。

表1 全电路性能仿真结果

Tab. 1 Full circuit performance simulation results

项目	指标
有效光敏元规模	640 × 512
光敏元中心间距/ μm^2	50 × 50
积分模式	四波段分时积分,分别可调 (中长波不交叠积分)
读出方式	边积分边读出 IWR
模拟信号输出摆幅/V	≥ 2.8
电路噪声/mV	≤ 0.5
动态范围/dB	70
最高工作主频/MHz	20
输出端口数	1 端口/波段
帧频/Hz	四波段 ≥ 50
电功耗/mW	≤ 600
工艺	XFAB_0.35 μm _5 V_STITCH

5 结论

本文设计了一款对应多色叠层量子阱型器件的红外焦平面探测器读出电路,能够实现同时间、同空间对四波段信号进行探测,并且同时读出,四波段信号的探测积分与读出之间没有互相干扰。探测器规格640 × 512,像元间距50 μm (四波段),各波段信号可实现分时积分、分别可调,采用边积分边读出工作模式,读出帧频可达到四波段探测时 ≥ 50 Hz,电路噪声 ≤ 0.5 mV,动态范围 ≥ 70 dB,电功耗 ≤ 600 mW,是一款超大规模

低噪声高帧频的高性能读出电路。未来可以应用于多色探测器高速读出电路,提升红外探测器性能。

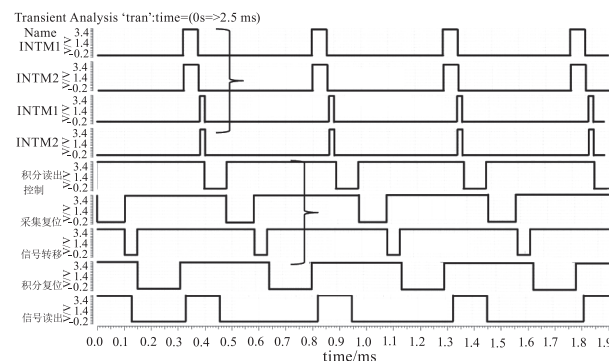


图9 全电路四波段探测读出仿真结果

Fig. 9 Full circuit four-band detection readout simulation results

参考文献:

- [1] Gao Dan, Zhang Qiaoqiao. Choice and development of the third-generation infrared detectors [J]. Technology Innovation and Application, 2016, (1): 85–86. (in Chinese) 高丹, 张乔乔. 论第三代红外探测器的需求及选择 [J]. 科技创新与应用, 2016, (1): 85–86.
- [2] Su Yanmei, Seed Ming, Zeng Yiping, et al. 128 × 128 three-electrode mid/long-wavelength dual-color quantum well infrared detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 215(9): 2249–2252. (in Chinese) 苏艳梅, 种明, 曾一平, 等. 128 × 128 三电极中/长波双色量子阱红外探测器 [J]. 红外与激光工程, 2012, 215(9): 2249–2252.
- [3] Huo Yongheng, Ma Wenquan, Zhang Yanhua, et al. Dual-band quantum well infrared photodetectors with two ohmic contacts [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(9): 740–745. (in Chinese) 霍永恒, 马文全, 张艳华, 等. 两端叠层结构的中长波量子阱红外探测器 [J]. 物理学报, 2011, 60(9): 740–745.
- [4] Zhao Yonglin, Li Xianjie, Liu Yingbin, et al. Mid-wavelength and long-wavelength two-color quantum well infrared photodetectors [J]. Micro-Nano Electronics, 2008, 379(12): 689–693. (in Chinese) 赵永林, 李献杰, 刘英斌, 等. 中波-长波双色量子阱红外探测器 [J]. 微纳电子技术, 2008, 379(12): 689–693.
- [5] Kang Bingxin, Li Yu, Bai Pijie, et al. Design of a novel current mirroring integration readout integrated circuit for quantum well infrared photodetectors [J]. Infrared Technology, 2012, 230(2): 95–98. (in Chinese) 康冰心, 李煜, 白丕绩, 等. 新型电流镜积分红外量子阱探测器读出电路的设计分析 [J]. 红外技术, 2012, 230(2): 95–98.