

文章编号: 1672-8785(2025)02-0001-12

光导型石墨烯探测器暗电流抑制电路研究

仝浙哲^{1,2} 申 钧^{2,3*}

(1. 重庆邮电大学, 重庆 400065;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对光导型石墨烯探测器暗电流大的特点, 在分析几种暗电流抑制电路的基础上, 利用电容反馈跨阻放大器 (Capacitive Trans-Impedance Amplifier, CTIA) 积分电路设计了一种新型低温度系数暗电流抑制电路。仿真分析结果表明, 该结构具有良好的暗电流抑制能力。相比于传统 CTIA 结构, 积分饱和时间提升显著, 并且具有良好的积分均匀性和输出线性度。在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 电流-温度误差率为 0.15% , 电压偏移量不到 80 mV , 能够在室温条件下保持良好的暗电流抑制功能。探测器偏置电压漂移改善 88.7% , 为探测器稳定工作提供了保障。同时, 抑制电流的大小可调, 为改善石墨烯基探测器像元的不均匀性和未来制备大规模的石墨烯基探测器阵列提供了参考。

关键词: 光导型; 石墨烯; 暗电流抑制; 电容反馈跨阻放大器; 低温度系数

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.02.001

Study on Dark Current Suppression Circuit of Photoconductive Graphene Detector

TONG Xi-zhe^{1,2}, SHEN Jun^{2,3*}

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of large dark current of photoconductive graphene detector, based on the analysis of several dark current suppression circuits, a novel dark current suppression circuit with low temperature coefficient is designed by using the capacitive trans-impedance amplifier (CTIA) integration circuit. The simulation analysis results show that the structure has good dark current suppression capability. Compared with the traditional CTIA structure, the integral saturation time of this structure is significantly improved, and it has good integral uniformity and output linearity. In the temperature range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, the current-temperature error rate is 0.15% , and the voltage offset is less than 80 mV , which can maintain good dark current suppression function at room temperature. The detector bias voltage drift is improved by

收稿日期: 2024-08-23

作者简介: 仝浙哲(1999-), 男, 陕西人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电探测器读出电路。

*通讯作者: E-mail: shenjun@cigit.ac.cn

88.7%, which provides a guarantee for the stable operation of the detector. At the same time, the suppression current is adjustable, which provides a reference for improving the non-uniformity of graphene-based detector pixels and preparing large-scale graphene-based detector arrays in the future.

Key words: photoconductive; graphene; dark current suppression; capacitive trans-impedance amplifier; low temperature coefficient

0 引言

红外焦平面阵列由探测器阵列和读出电路组成^[1], 其中每一个探测像元以单点式或者混合式连接到读出电路上。如果它们都具有独立的运算放大器来完成光电转换和放大, 则被称为有源像素传感器 (Active-Pixel Sensor, APS)^[2]。一个性能良好的红外焦平面阵列应该具有集成小型化、高速智能化、大阵列多色化等^[3]特点。根据工作温度的不同, 红外焦平面探测器可以分为制冷式和非制冷式; 根据对不同波段的响应情况, 可以分为近红外、中红外、远红外和极远红外探测器等^[4]。由于不需要制冷结构, 非制冷焦平面探测器具有成本低、功耗小、体积小、重量轻、稳定性好等优点, 在红外识别、精准制导等军用领域和汽车夜视、精准检测等民用及工业领域中占据重要地位^[5]。

石墨烯是一种具有零带隙且费米能级易调控、载流子迁移率高的材料。同时, 石墨烯也具有超快光电响应、超宽波段响应的特点, 能够适用于日益增长的高速和宽波段通讯的实际应用需求^[6]。将石墨烯与其他材料复合形成异质结后, 基于光诱导局域场调控效应可实现超高光电导增益^[7]。具体来说, 光诱导局域场调控效应是指光生载流子在材料电荷陷阱处积累产生电势, 通过电势产生栅压, 从而调控晶体管沟道中的载流子, 最终实现对电导率进行调控的光电转换机理。

基于光诱导局域场调控效应的转换机理可以制成高响应率和高响应速度的光导型石墨烯异质结探测器^[8]。现阶段科研人员已经实现的光导型石墨烯异质结探测器的响应度超过 10^7 A/W、比探测率大于 7×10^{13} cm $\cdot$ Hz^{1/2}/W, 响

应速度超过毫秒量级, 但是暗电流也会在 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ A 左右^[9], 存在暗电流大的问题。因此需要在低温环境下或者设计特定的暗电流抑制结构来抵消暗电流, 从而增大动态范围和信噪比。图 1 所示为实验测得的石墨烯-硫化铅器件的电流曲线。

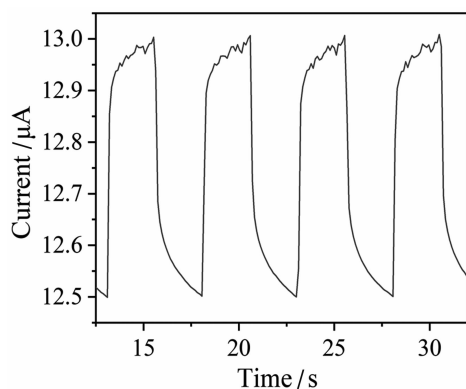


图 1 石墨烯-硫化铅器件的电流曲线

石墨烯探测器能够与互补型金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 工艺兼容。2017 年, Goossens S 等人利用这一特性实现了基于盲元电阻补偿暗电流的 388×288 石墨烯-CMOS 图像传感器^[10]。同时, 许多研究人员也使用 CMOS 工艺来制作暗电流抑制结构并设计读出电路。2021 年, Crastes S A 等人已经实现利用盲元补偿暗电流的 640×480 (像元间距为 $17 \mu\text{m}$) 全数字化图像传感器^[11]。2022 年, Kim K D 等人实现了集成偏置数模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 的低成本 80×60 CMOS 成像仪。他们利用 DAC 来调控盲元的补偿暗电流^[12]。但是由于电阻占用面积大、匹配性差, 未来超大规模石墨烯探测器阵列仍需采用其他的暗电流抑制方式。

本文基于石墨烯探测器的特点, 在传统

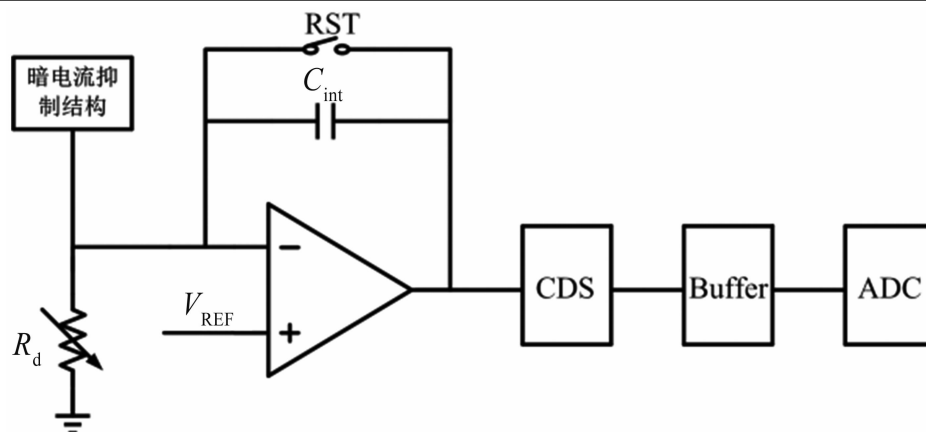


图 2 读出电路系统结构

CTIA 积分电路的基础上分析和改进几种暗电流抑制电路, 然后利用金属-氧化物-半导体场效应管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) 漏极电流和三极管发射极电流的正负温度系数特点, 设计一种新型低温度系数的暗电流抑制电路, 最后利用 Spectre 仿真器对电路进行仿真, 并对仿真结果进行分析。

1 读出电路系统结构

1.1 整体系统及工作原理

如图 2 所示, 整个读出电路由探测器像元、偏置结构、带隙基准电压结构、暗电流抑制结构、CTIA 结构、相关双采样 (Correlated Double Sampling, CDS) 结构、缓冲结构组成; 后续还可接入模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC), 将模拟信号转换为数字信号, 并将其传输至计算机进行进一步的信号处理和成像^[13]。

读出电路的工作原理如下: 利用运算放大器对探测器像元加上恒定的电压偏置, 使其正常工作; 当光照在像元电阻上时, 由于光诱导局域场的作用产生光生电流, 用暗电流抑制结构抵消探测器的暗电流, 然后将抵消后的净光电流输入 CTIA 结构进行积分过程, 再对积分后的电压进行采样、缓冲、模数转换, 最后将其输入到下一个单元。

1.2 CTIA 电路结构

红外焦平面探测器的性能与读出电路密切

相关。典型的读出电路有 CTIA 结构、自积分结构、源跟随器结构、直接注入结构^[14]、栅调制输入结构、缓冲直接注入结构、公共缓冲直接注入结构等。一个高性能的读出电路需要具备以下特点: 高注入效率、高线性度、低噪声、稳定的偏置电压、高灵敏度。综合上述分析, 本设计采用图 3 所示的 CTIA 积分电路。

CTIA 积分电路由一个高增益的运算放大器、一个复位开关以及一个积分电容构成。将积分电容以负反馈的形式接入运算放大器的两端, 并放置一个复位开关来控制积分时间。运算放大器的正端接入参考电压 V_{REF} 。根据运算放大器“虚短”和“虚断”的特性, 可以把运算放大器的反向输入端固定为参考电压 V_{REF} , 并且将电流输入到积分电容进行积分。CTIA 积分电路有两种工作状态: (1) 复位状态。当复位开关 RST 闭合时, 积分电容被短路, 运算放大器短接为单位增益缓冲器的模式, 输出

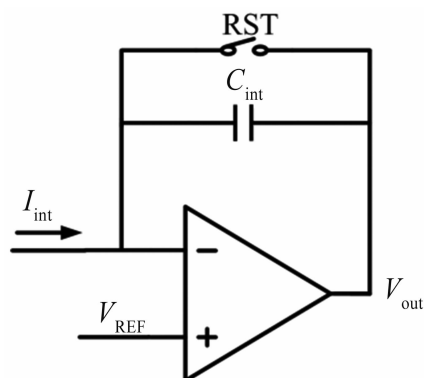


图 3 CTIA 积分电路

V_{out} 等于 V_{REF} 。(2)积分状态。当复位开关 RST 断开时, 电流正常流入积分电容进行积分。设积分时间为 t , 则输出电压为

$$V_{out} = V_{REF} + \frac{A}{1+A} \cdot \frac{I_{int} \cdot t}{C_{int}} \quad (1)$$

式中, A 为运算放大器的增益。

2 暗电流抑制电路分析与设计

石墨烯基光电导探测器在正常工作的条件下可以等效为光敏电阻, 但是其光生电流远小于暗电流。对于石墨烯探测器来说, 具有很大的暗电流会对信号的采集造成十分重大的干扰。为了提取出暗电流背景下微弱的光电流, 抑制和消除暗电流是读出电路制备中必不可少的环节。暗电流抑制电路有电阻型、电容型、电压-电流转换的 MOS 管型等多种形式。

2.1 电阻型暗电流抑制电路

电阻型暗电流抑制电路使用一个与探测器电阻阻值大小相等的匹配电阻来实现抑制暗电流的功能^[15]。

如图 4 所示, 电阻型暗电流抑制电路由探测器像元电阻 R_d 、匹配电阻 R_{dm} 、运算放大器、反馈电容以及复位开关组成。其中, V_{REF} 为电源电压的一半。电路的工作原理如下: 无外加光的条件下($t=0$), 利用匹配电阻 R_{dm} 产生与探测器电流 I_{det} 大小相等的抑制电流 I_{dark} 来抵消暗电流, 此时根据基尔霍夫电流定律可

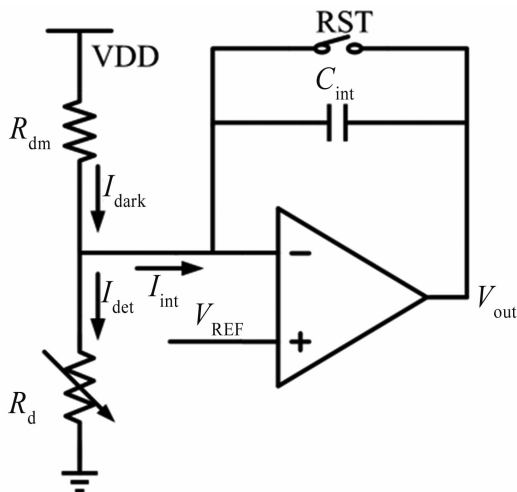


图 4 电阻型暗电流抑制电路的原理图

得输入积分电路的净光电流 I_{int} :

$$I_{int}(0) = I_{det}(0) - I_{dark}(0) = 0 \quad (2)$$

在外加光照的条件下($t=t_0$), 探测器像元电阻 R_d 感光后阻值减小。由于运算放大器“虚短”的特性, 反向输入端的电压大小基本不变, 探测器的电流 I_{det} 变大。此时的净光电流 I_{int} 为

$$\begin{aligned} I_{int}(t_0) &= I_{det}(t_0) - I_{dark}(t_0) \\ &= \frac{V_d R_{dm} - V_{dm} R_d}{R_d R_{dm}} \end{aligned} \quad (3)$$

电阻型暗电流抑制电路的优点是制作简单, 但缺点是面积较大、电阻的稳定性相对较差。同时, 由于处在不同环境时探测器像元的电阻会随着温度或者环境光的改变而发生变化, 而匹配电阻的阻值恒定不变, 所以难以提供良好的暗电流抑制效果。

2.2 电容型暗电流抑制电路

电容型暗电流抑制电路是基于传统开关电流电路的思想进行改进的暗电流抑制电路^[16]。首先对暗电流进行复制, 通过存储单元对复制的暗电流进行“记忆”, 最后保持“记忆”状态将复制的电流输出到积分的输入端, 达到抵消光电流中暗电流的目的, 从而对净光电流进行积分。

如图 5 所示, 传统的开关电流电路主要有采样和保持两种工作状态。采样状态下, 控制

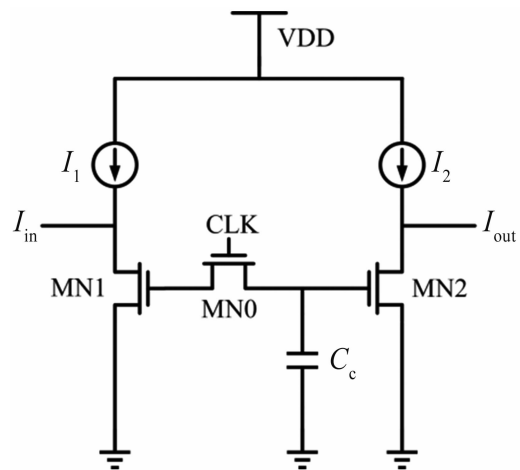


图 5 开关电流电路的原理图

采样电容 C_c 的开关管为导通状态, 对输入电流 I_{int} 与电流源 I_1 之和进行积分并建立电压 V_{C_c} 。保持状态下, 控制采样电容的开关断开, 使电压 V_{C_c} 作用在 MN0 的栅极上, 将 V_{C_c} 转换为电流。此时输出电流为

$$I_{\text{out}} = I_1 + I_{\text{in}} - I_2 \quad (4)$$

设置电流源 $I_1 = I_2$ 或者调整合适的宽长比可以得到 $I_{\text{out}} = -I_{\text{in}}$ 。基于传统的开关电流电路, 通过改进可以得到一种电容型暗电流抑制电路。

图 6 所示的暗电流抑制电路由探测器像元电阻 R_d 、电流源 I_1 、PMOS 管 MP1~MP4、采样电容 C_c 、采样开关 S_0 、复位开关、积分电容以及运算放大器组成。电容型暗电流抑制电路的工作原理如下: 采样阶段中, 在无光照的条件下, 闭合开关 S_0 , 将探测器在偏置电压 V_{REF} 下产生的电流 I_{det} 充入电容 C_c , 建立电压 V_{C_c} 。保持阶段中, 在光照的条件下, 断开开关 S_0 , MP1 管将采样的电压 V_{C_c} 转换成电流 I_{dark} (与探测器电流 I_{det} 抵消), 从而将净光电流 I_{int} 输入到 CTIA 电路结构中进行积分。其中的 MP1 既作为采样状态的采样管又作为保持状态的输出管, 减小了传统开关电流电路中不同管采样与保持之间的不匹配性; MP2~MP4 的作用是提供稳定的电流、保证电路正常工作和增加暗电流抑制结构的输出阻抗。电路中采用 CMOS 开关或者虚拟开关来减小沟道电荷注入效应。

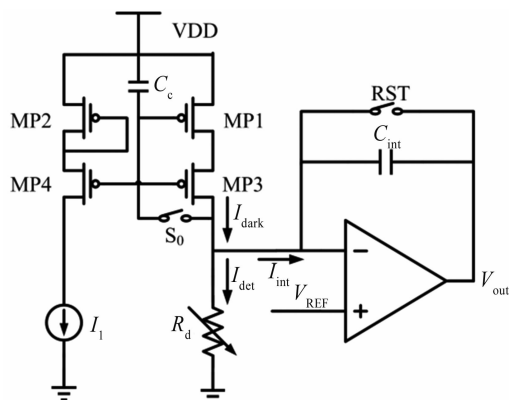


图 6 电容型暗电流抑制电路的原理图

改进的电容型暗电流抑制电路相对于传统的开关电流电路具有更好的复制效果, 减小了复制过程中的不匹配性。又因为电容型暗电流抑制电路是对无光照情况下的暗电流进行“实时”复制, 所以探测器像元电阻在较小范围内变化时也能较准确地采样并且输出。但是如果背景光较强或者探测器像元电阻由于环境原因出现较大程度的变化, 那么采样和输出的效果就会变差。

2.3 MOS 电流源型暗电流抑制电路

利用 MOS 管可作为电流源的特性, 通过控制 MOS 管的栅极电压来控制其漏极电流的大小, 产生一个与探测器暗电流大小相等的抑制电流。

如图 7 所示, MOS 电流源型暗电流抑制电路由探测像元电阻 R_d 、NMOS 电流源 M1、输入开关 M2、运算放大器、积分电容以及复位开关组成。该电路的工作原理如下: 无外加光照的条件下 ($t=0$), 开关管 M2 断开, 调整 M1 的栅极电压, 使得抑制电流 I_{dark} 的大小与探测器电流 I_{det} 的大小相等。

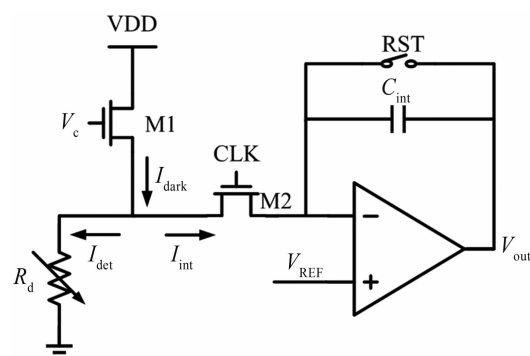


图 7 MOS 电流源型暗电流抑制电路的原理图

在外加光照的条件下 ($t=t_0$), M1 的栅极电压不变, 产生的抑制电流 I_{dark} 大小不变, 开关管 M2 闭合, 此时的输入电流 I_{int} 为

$$I_{\text{int}}(t_0) = I_{\text{det}}(t_0) - I_{\text{dark}}(t_0) \quad (5)$$

MOS 电流源型暗电流抑制电路的优点是结构简单、性能可靠, 仅仅使用两个 MOS 管就能实现对探测器暗电流的抑制作用, 又能为电路提供稳定的电流; 同时, 可通过调整

MOS 电流源的栅压来提供所需的电流，且积分电路具有十分良好的线性度。缺点是 MOS 管具有温度特性：随着温度的改变，漏端电流也会发生变化，因此很难做到在不同温度下保持恒定大小的抑制电流。

2.4 新型低温度系数暗电流抑制电路

为了实现积分线性度高、面积小、温漂系数低的目的，利用 MOS 管的漏极电流的负温度系数和三极管发射极的正温度系数设计了一种与温度相关性低的暗电流抑制电路。

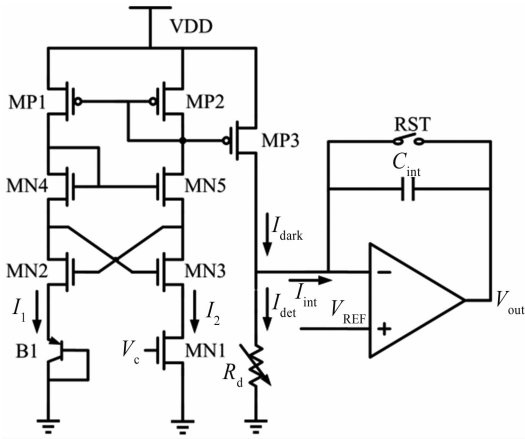


图 8 新型低温度系数暗电流抑制电路的原理图

如图 8 所示，新型低温度系数暗电流抑制电路主要由探测器像元电阻 R_d 、三极管 B1、PMOS 管 MP1~MP4、NMOS 管 MN1~MN5、复位开关、积分电容以及运算放大器组成。该电路的工作原理如下：通过控制 MN1 栅压 V_c 来产生漏极电流。处于饱和区的 MN1 漏极电流可表示为

$$I_2 = I_{MN1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (6)$$

MN4、MN5、MP1、MP2 用于构建反馈回路，一方面是保证两条支路中的电流 $I_1 = I_2$ ，另一方面是减小 I_2 对电源的敏感度。其中，MN4、MN5 要保证相同的尺寸，MP1、MP2 也要保证相同的尺寸。由于三极管的发射极电流是正温度系数而饱和区 MOS 管的漏极电流是负温度系数，可以采用三极管 B1 来补偿 MN1 漏极电流的温度系数。用三极管的发射极电流对温度求导，可以得到：

$$\frac{\partial I_e}{\partial T} = (1 + \beta) \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T} - \frac{E_g}{KT}\right) \times \left[(4 + m) b T^{3+m} + b T^{2+m} \cdot \frac{E_g}{K} \right] \quad (7)$$

式中， β 表示三极管的放大倍数， m 表示与工艺相关的参数。

用 MN1 的漏极电流对温度求导，可以得到：

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_2}{\partial T} &= \frac{\partial I_2}{\partial V_{TH}} \cdot \frac{\partial V_{TH}}{\partial T} \\ &= -\frac{m}{2T} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) \end{aligned} \quad (8)$$

通过调整合适的 B1 和 MN1 尺寸，可以将抑制电流 I_{dark} 的温度系数设计得很小。同时，MN1 受到电源的影响也非常小。这样就可以保证栅压 V_c 能够精确调控抑制电流，从而实现效果好、精度高、温度系数小的暗电流抑制作用。若要保证温度补偿的作用，则必须保证节点 X 的电压等于节点 Y 的电压。这个过程通过反馈结构和 MN2、MN3 实现。其中 MN2 和 MN3 也要保证尺寸相同。

新型低温度系数暗电流抑制电路的优点是抑制电流基本不随温度变化，而且抑制电流的大小可调，对于环境光、温度或者探测器自身电阻不均匀引起的较大范围的暗电流变化也能起到很好的抵消作用，极大提升了积分线性度。同时，由于不使用电阻或者电容，也可以相对节省面积。

3 仿真结果

3.1 积分电路的仿真结果

利用 Spectre 软件对 CTIA 积分电路进行仿真。假设输入电流为 500 nA，积分时间为 2 μ s，积分电容大小为 1 pF，参考电压 V_{REF} 为 2.5 V。为了保证高注入效率，所用运算放大器的开环增益约为 85 dB，单位增益带宽约为 50 MHz。

复位开关 RST 为高电平时将其断开，积分电容开始积分， V_{out} 从 2.5 V 上升到 3.5 V (见图 9)，积分放大电路符合要求。

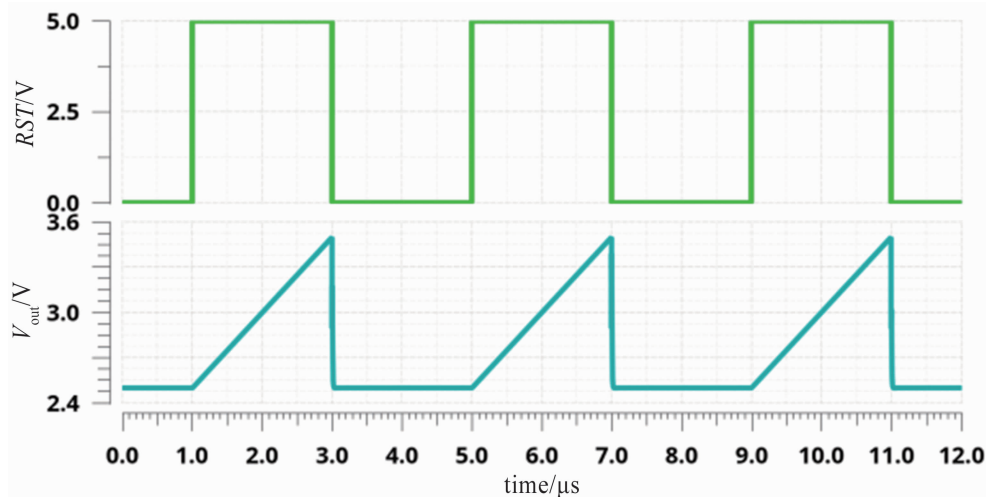


图 9 CTIA 积分电路的仿真图

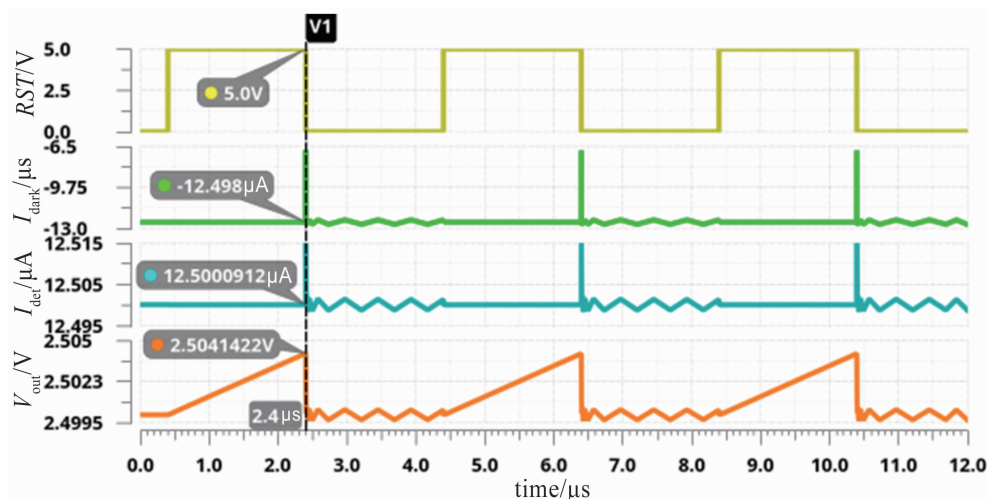


图 10 新型低温度系数暗电流抑制电路的仿真图

3.2 新型低温度系数暗电流抑制电路仿真

根据实验测试所得数据, 石墨烯基探测器在 2.5 V 偏压、无光照条件下的等效电阻为 200 kΩ, 暗电流大小约为 12.5 μA, 光生载流子产生的净光电流峰值约为 0.5 μA。调整电压 V_o 的大小, 产生与暗电流大小相等的抑制电流。首先对无光照情况下的暗电流抑制电路进行仿真。积分时间为 2 μs, 积分电容为 1 pF。

如图 10 所示, 无光照条件下探测器等效电阻在 2.5 V 偏置电压下产生大小为 12.5 μA 的暗电流, 新型低温度系数暗电流抑制电路已经产生大小为 12.498 μA 的抑制电流, 输出偏移约为 0.004 V, 可以达到 99.9% 的抑制效果。

对传统 CTIA 积分电路的积分饱和时间以

及加入新型低温度系数暗电流抑制电路后的积分饱和时间进行仿真分析。由图 11 可知, 无光照条件下传统 CTIA 积分电路的积分饱和时间为 210 ns。由图 12 可知, 加入新型低温度暗电流抑制电路后的积分饱和时间为 1.5 ms, 提升了 7000 倍左右。

当石墨烯基探测器在正常工作的条件下, 根据单元器件测试得到, 外加光照引起阻值的变化量为 0~5%。可将光照强度的变化用探测器阻值的变化来表示, 并将其与净光电流建立关系: 等效净光电流 I_{int} 变化量为 0~500 nA。此时光电流 I_{det} 的变化量为 12.5~13 μA, 取步进值为 100 nA, 对光照条件下的积分饱和时间进行仿真。

如图 13 所示, 在光照条件下, 光电流为

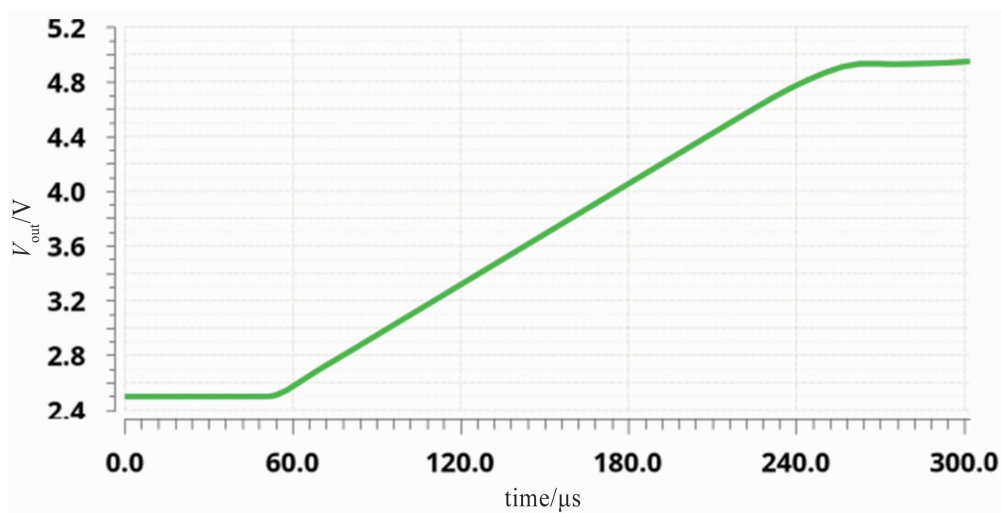


图 11 无光照条件下传统 CTIA 积分电路的积分饱和和时间仿真图

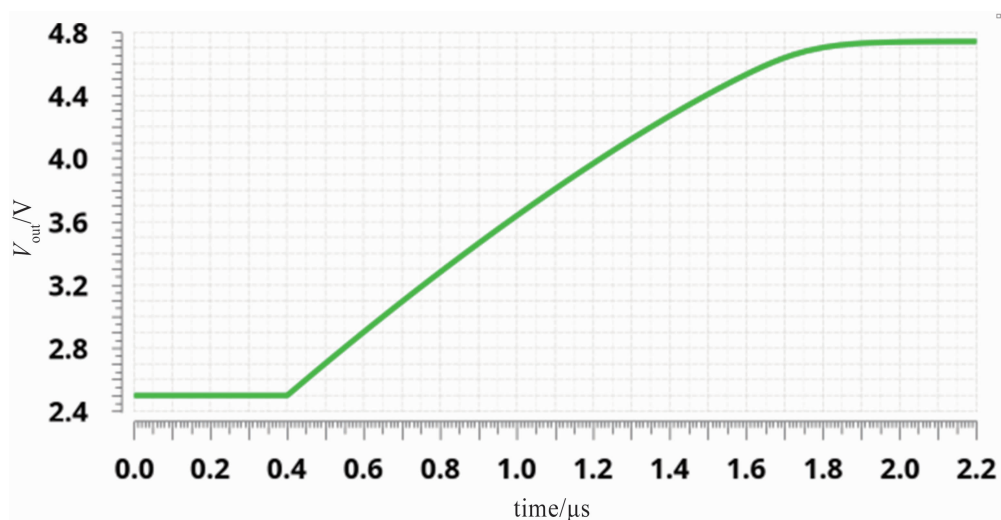


图 12 无光照条件下加入新型低温度系数暗电流抑制电路后的积分饱和和时间仿真图

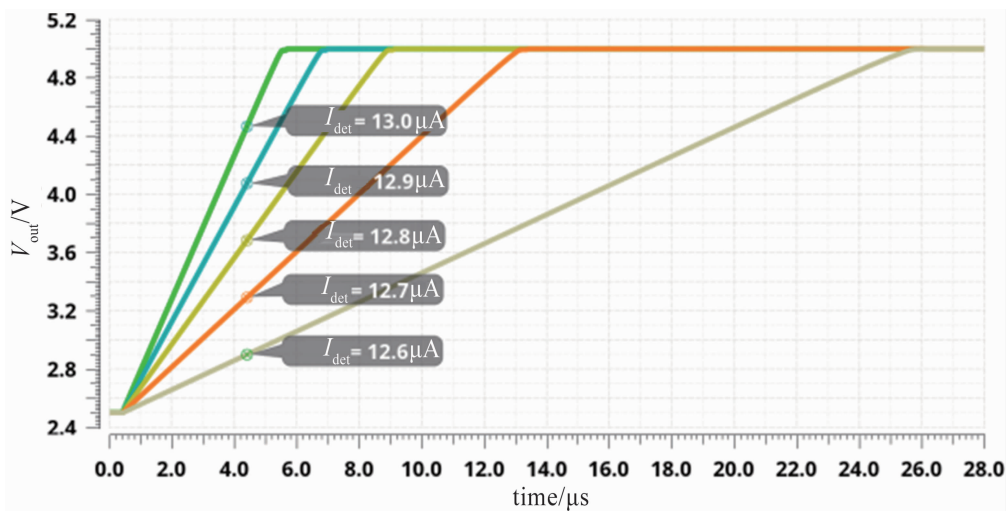


图 13 光照条件下加入新型低温度系数暗电流抑制电路后的积分饱和和时间仿真图

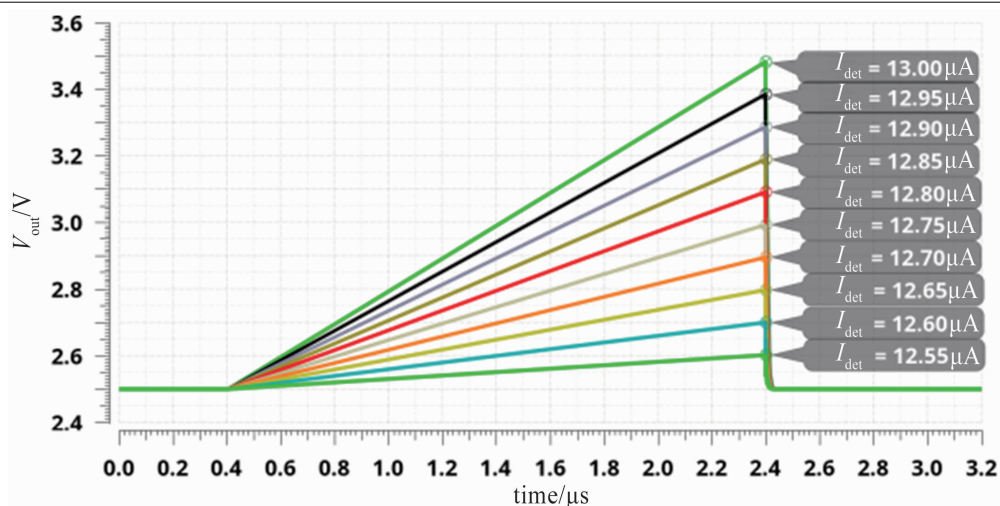


图 14 不同光强对应的输入光电流积分仿真图

12.6 μA 时, 积分饱和时间约为 5.5 μs ; 光电流为 13 μA 时, 积分饱和时间约为 26 μs 。由于传统 CTIA 积分电路的净光电流相对于暗电流很小, 所以光照条件下的积分饱和时间基本不变。在最大光电流的条件下, 积分饱和时间提升了 26 倍, 表明相比于传统结构, 新型暗电流抑制电路能够很好地减小暗电流对电路信号的影响, 极大提升电路的信噪比。

为了探究不同光照强度所对应的光电流经过抑制后的积分线性度, 建立光电流与光照强度的关系, 取合适阻值变化量, 在光电流 I_{det} 步进值为 50 nA 时进行仿真。

从图 14 中可以看出, 对于不同光照引起的光电流变化, 积分的均匀性良好。同时, 另取步进值为 25 nA, 将输入光电流与输出电压进行线性拟合。

如图 15 所示, 随着输入光电流的等差增大, 输出电压也等差增大, 线性度为 99.9%, 表明本文提出的暗电流抑制电路具有很好的输出线性度。

为了探究不同温度下新型低温度系数暗电流抑制电路产生的抑制电流随温度的变化情况, 对 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ 温度区间进行扫描。

如图 16 和图 17 所示, -20°C 时暗电流抑制结构输出的电流为 12.464 μA , 40°C 时暗电流抑制结构输出的电流为 12.508 μA , 在此温度范围内偏移电流大小为 0.044 μA , 电流-

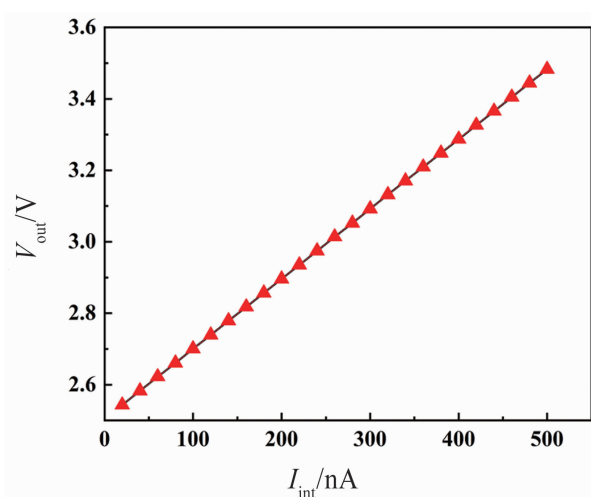


图 15 输出电压随输入光电流的变化曲线

温度误差率为

$$\text{Error} = \frac{I_2 - I_1}{T_2 - T_1} \times 100\% \quad (9)$$

由式 (9) 可以得到, 电流-温度误差率为 0.15%, 引起的电压偏移量不到 80 mV, 说明暗电流抑制结构在 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内对温度的敏感性低, 室温下也能正常工作。

3.3 探测器的偏置稳定性分析

探测器的偏置电压是由 CTIA 积分电路中的运算放大器来提供的。由于受到探测器暗电流的影响, 运算放大器的负向输入端电压会在积分时刻下拉, 从而影响探测器偏置的稳定性。随着光电流的增加, 电压下拉值也会呈正比例增大。首先对传统 CTIA 积分电路的探测器偏置电压下拉情况进行仿真。

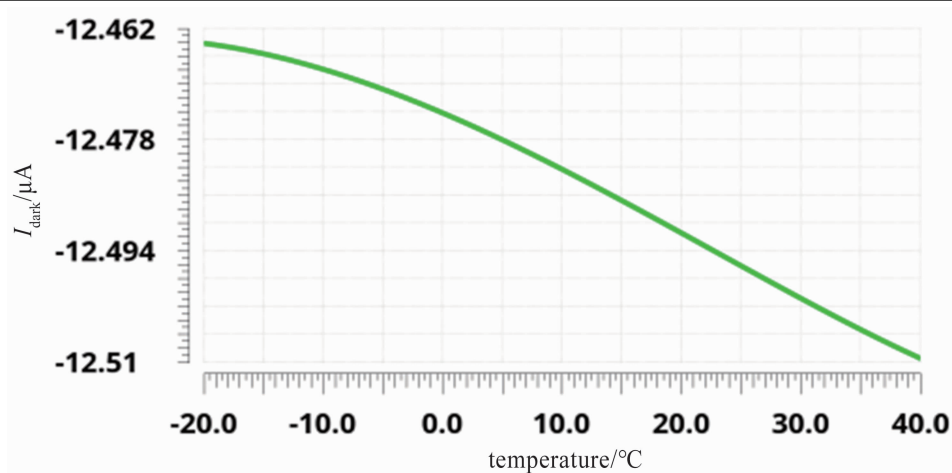


图 16 抑制电流随温度变化的仿真图

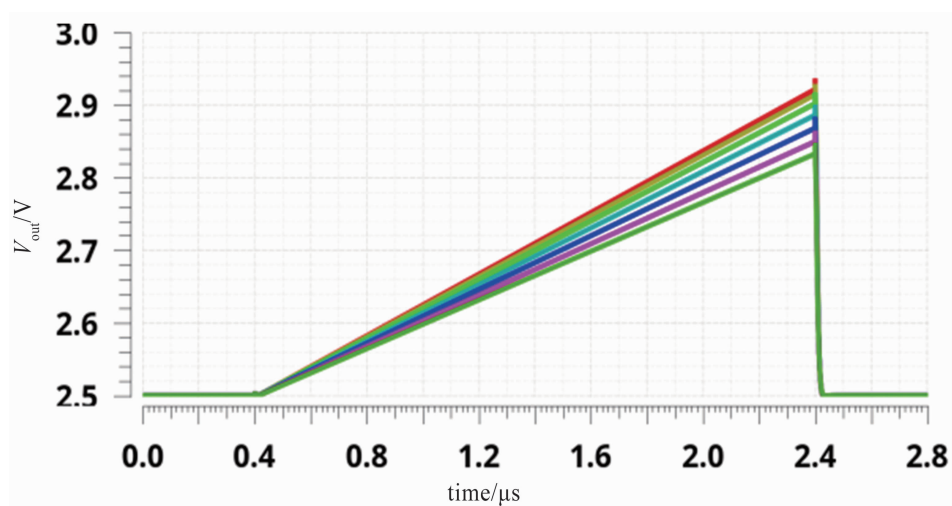


图 17 积分电压随温度变化的仿真图

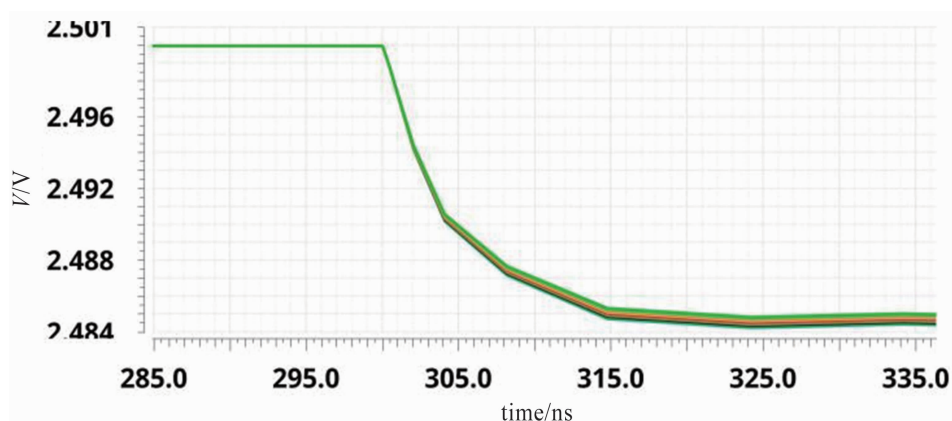


图 18 传统 CTIA 电路探测器的偏置电压下拉仿真图

从图 18 中可以看出, 由于暗电流的影响较大, 传统 CTIA 积分电路在 $12.5 \sim 13 \mu\text{A}$ 光电流下偏置电压的下拉变化不大, 积分时刻的下拉值为 15 mV 。

加入新型低温度系数暗电流抑制电路, 取光电流为 $12.5 \sim 13 \mu\text{A}$ 、步进值为 50 nA , 对探测器偏置电压的下拉情况进行仿真。

如图 19 所示, 当光电流大小为 $12.5 \mu\text{A}$

时, 探测器偏置电压的下拉值最小(0.02 mV); 当光电流大小为 $13\text{ }\mu\text{A}$ 时, 探测器偏置电压的下拉值最大(1.7 mV)。对比传统 CTIA 电路探测器的偏置电压下拉情况, 当光电流最大时, 偏置电压的漂移改善 88.7%, 能够提升探测器偏置电压的稳定性。

3.4 单元读出电路的仿真结果

基于上述暗电流抑制结构, 搭建了单元读出电路并对加入新型暗电流抑制电路后的输出进行了仿真。输入光电流 I_{det} 从 $12.5\text{ }\mu\text{A}$ 到 $13\text{ }\mu\text{A}$, 取步进值为 50 nA 时得到图 20 所示的单元读出电路的输出电压曲线。

从图 20 中可以看出, 单元读出电路的输出线性度良好, 能够很好地处理探测器的输入信号并将其输出。该研究为后续将模拟信号数字化的工作奠定了一定的基础。

4 结束语

本文在分析传统暗电流抑制电路的基础上, 利用三极管和 MOS 管电流的温度系数特点, 基于 CTIA 积分电路设计出一种积分线性和均匀性高、温度系数低、抑制电流可调的新型低温度系数暗电流抑制电路, 有利于解决石墨烯光导型探测器暗电流偏大的问题。通过 Spectre 软件仿真可知, 该结构具有良好的暗电流抑制能力。相比于传统 CTIA 积分电路, 积分饱和时间提升显著。在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 电流-温度误差率为 0.15%, 电压偏移量不到 80 mV, 能够在室温条件下保持良好的抑制功能。同时, 探测器偏置电压漂移改善 88.7%, 为探测器稳定工作提供了保障。未来将研究本文提出的单元级暗电流抑制电路在大规模焦平面阵列探测器中的应用, 并探究基于

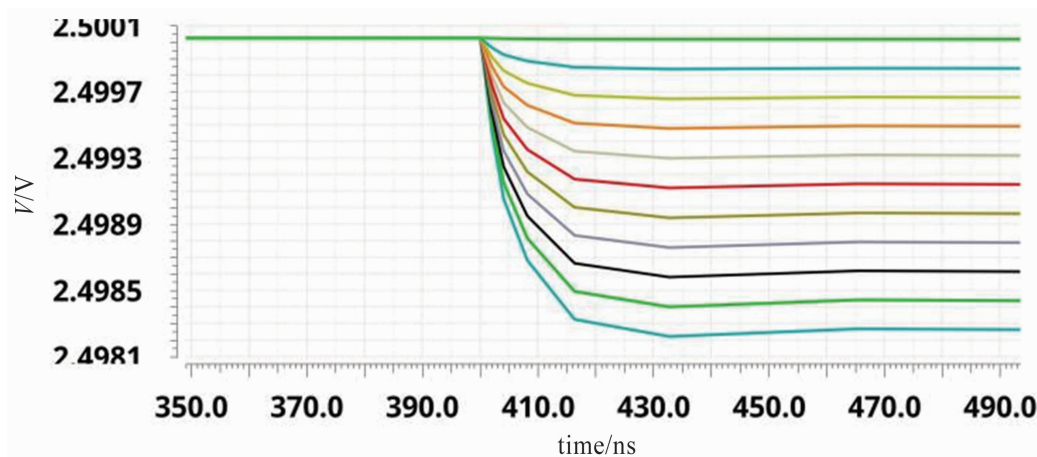


图 19 加入新型低温度系数暗电流抑制电路后的偏置电压下拉仿真图

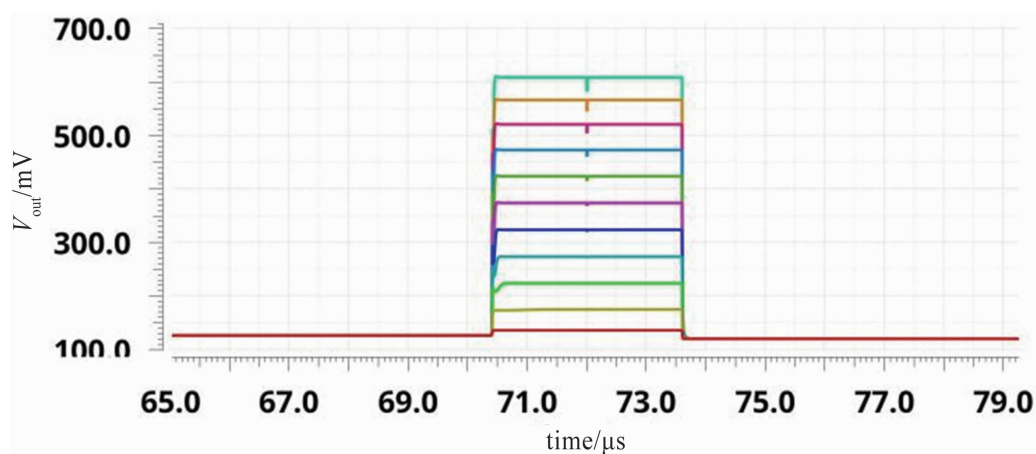


图 20 单元读出电路仿真图

更小线宽工艺节点的暗电流抑制方法。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Peri c I, Andreazza A, Augustin H, et al. High-voltage CMOS active pixel sensor [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, **56**(8): 2488–2502.
- [3] 刘伟, 牛誉霏, 肖龙龙, 等. 红外焦平面阵列及星载红外成像系统的发展 [J]. 红外, 2021, **42**(11): 15–24.
- [4] 王欣. 红外焦平面阵列探测器的研究进展 [J]. 舰船电子工程, 2020, **40**(9): 157–161.
- [5] Kimata M. Uncooled infrared focal plane arrays [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, **13**(1): 4–12.
- [6] Xie C, Mak C, Tao X, et al. Photodetectors based on two-dimensional layered materials beyond graphene [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(19): 1603886.
- [7] 雷挺, 吕伟明, 吕文星, 等. 光栅局域调控二维光电探测器 [J]. 物理学报, 2021, **70**(2): 263–273.
- [8] Fang H, Hu W. Photogating in low dimensional photodetectors [J]. *Advanced Science*, 2017, **4**(12): 1700323.
- [9] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, **7**(6): 363–368.
- [10] Goossens S, Navickaite G, Monasterio C, et al. Broadband image sensor array based on graphene-CMOS integration [J]. *Nature Photonics*, 2017, **11**(6): 366–371.
- [11] Crastes S A, Ruiter M, Gierkink S S, et al. Recent uncooled IR development based on state of the art digital ROIC [C]. *SPIE*, 2021, **11831**: 118310H.
- [12] Kim K D, Park S, Lee B, et al. A 80×60 microbolometer CMOS thermal imager integrated with a low-noise 12-B DAC [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, **69**(8): 8604–8608.
- [13] Gupta H S, Kumar A S K, Baghini M S, et al. Design of high-precision ROIC for quantum dot infrared photodetector [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(15): 1673–1676.
- [14] Song P Y, Ye Z H, Huang A B, et al. Theoretical investigation on input properties of DI and CTIA readout integrated circuit [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(3): 1–7.
- [15] 韩钦, 高恺聪, 任思伟, 等. 石墨烯与典型光导型光电探测器读出电路的对比研究 [J]. 红外技术, 2022, **44**(2): 123–128.
- [16] 虞海燕, 林争辉, 张海飞. 一种低电荷注入误差的开关电流电路 [J]. 微电子学, 2004, **34**(5): 589–592.