

文章编号: 1672-8785(2024)03-0007-08

一种具有积分电容复用功能的 红外读出电路设计

辛亚萍 李敬国 苑 宁 薛艳茹

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 为提高长波红外探测器的电荷处理能力, 提出了一种积分电容复用技术。该技术将读出电路阵列分为奇偶行两个部分, 使奇偶行像素分开进行积分读出。当所有的奇行像素积分时, 所有的偶行像素均不进行积分。奇行像素复用偶行像素的积分电容, 奇行像素积分结束后按行列顺序依次读出。同样地, 当所有偶行像素积分时, 奇行像素不进行积分, 偶行像素复用奇行像素的电容, 积分完成后偶行像素按顺序读出。相比于使用叠层电容来提高电荷处理能力的方法, 积分电容复用技术更加有效且不受工艺限制。仿真结果表明, 积分电容复用技术可将像素的等效积分电容提升至原来的 2 倍, 使读出电路的电荷处理能力从 20 Me^- 提升至 40 Me^- 。

关键词: 读出电路; 积分电容复用; 大电荷处理能力; 高灵敏度

中图分类号: TN4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.03.002

Design of an Infrared Readout Circuit with Integral Capacitor Multiplexing Function

XIN Ya-ping, LI Jing-guo, YUAN Ning, XUE Yan-ru

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: To improve the charge processing capability of longwave infrared detectors, an integrated capacitor multiplexing technology is proposed. This technology divides the readout circuit array into two parts: odd and even rows. The odd and even row pixels are integrated and read out separately. When all odd row pixels are integrated, all even row pixels are not integrated. The odd row pixels reuse the integration capacitance of even row pixels, and after the integration of odd row pixels is completed, they are read out in order of row and column. Similarly, when all even row pixels are integrated, odd row pixels are not integrated, and even row pixels reuse the capacitance of odd row pixels. After integration is completed, even row pixels are read out in order. Compared to the method of using stacked capacitors to improve charge processing capacity, the integrated capacitor multiplexing technology is more effective and not limited by the process. The simulation results show that the integrated capacitance multiplexing technology can increase the equivalent integrated capacitance of pixels to twice the original value, and increase the charge processing ability of the readout circuit from 20 Me^-

收稿日期: 2023-08-25

作者简介: 辛亚萍(1996-), 女, 山东菏泽人, 硕士, 主要从事红外读出电路设计工作。

E-mail: xinyaping@163.com

to 40 Me⁻.

Key words: readout circuit; integral capacitor multiplexing; large charge processing capability; high sensitivity

0 引言

目前, 红外探测技术广泛应用于军事、工业、侦察和勘探等领域。任何物体都会向外发出红外辐射光信号, 红外探测技术通过捕捉光信号来进行探测^[1]。光信号被红外探测器转换为光电流。光电流进入读出电路后进行积分, 变为电压的形式; 然后通过存储、放大后输出给后端处理电路。经处理后可获取探测目标及背景的图像信息。

作为红外探测系统的核心, 红外探测器的性能在很大程度上决定了成像的质量。根据探测波段的不同, 红外探测器主要分为短波、中波、长波和甚长波探测器。近年来, 长波红外探测器的应用场景迅速增加, 因此成为目前红外探测器领域的重点研究方向。相较于短波和中波红外探测器, 长波红外探测器的暗电流至少要高出一个数量级, 因而用于长波红外探测器的读出电路需要更大的电荷处理能力, 以提高信噪比和灵敏度^[2]。

提高读出电路电荷处理能力最有效的方式之一是增大像元内部的积分电容。但积分电容的大小受像元尺寸的限制, 因此如何在有限的像元面积内提高电荷处理能力成为了长波红外焦平面读出电路设计的重要技术难点^[3]。常用的提高电荷处理能力的方式是采用叠层电容作为积分电容, 将不同层金属制作的电容进行并联, 并将其叠加在同一个像素空间内。此方法能够有效地提高电荷处理能力, 但并非所有加工工艺都支持不同类型的积分电容叠加。因而这种方法在采用时会受到流片工艺的限制。另外, 即使能够采用叠层电容加工, 可提高的积分电容大小也是有限的, 依然难以满足长波红外探测器的需求。

针对上述问题, 本文提出了一种用于提高电荷处理能力的积分电容复用技术。该技术能

够与叠层电容同时使用, 有效地提高长波红外探测器的电荷处理能力。本文将积分复用电容技术融合到一款像元中心间距为 15 μm、阵列规模为 1280 × 1024 的红外读出电路设计中, 使其具有默认模式和积分电容复用模式两种工作状态。在默认模式下, 读出电路的电荷处理能力可以达到 20 Me⁻; 在积分电容复用模式下, 读出电路的电荷处理能力可以达到 40 Me⁻。

1 积分电容复用电路设计

积分电容复用是提高探测器电荷处理能力的有效方式。其主要原理是, 在积分电容复用模式下, 将阵列按奇偶行分为两个部分, 所有奇行像元同时积分, 积分完成后进行依次读出; 接下来所有的偶行像元同时积分, 积分完成后进行依次读出。积分过程中, 相邻两行的像元能够实现积分电容的相互复用: 在奇行像元进行积分时, 可以占用偶行像元的积分电容; 在偶行像元进行积分时, 可以占用奇行像元的积分电容。这样就在有限的像元尺寸面积内实现了更大的积分电容, 将读出电路的电荷处理能力提高至原来的 2 倍, 有效提高了长波红外探测器的灵敏度。

相比于传统的快照积分模式, 积分电容复用模式在电路设计上的区别在于数字电路以及像素级, 模拟电路部分结构没有区别。下面先介绍积分复用模式在像素级的具体实现方式, 然后介绍数字电路的设计方法。

1.1 积分电容复用功能的像素级实现

本文设计了一款可实现积分电容复用功能的像素级, 其示意图如图 1 所示。首先, 按每两个相邻行的两个像素为一组, 将 1024 行 1280 列的阵列分为 1280 × 1024/2 组。每组都通过开关连接。然后设计一组时序信号 EN-BIN、GPOL、RS、RST_INT 和 GPOL_, 用

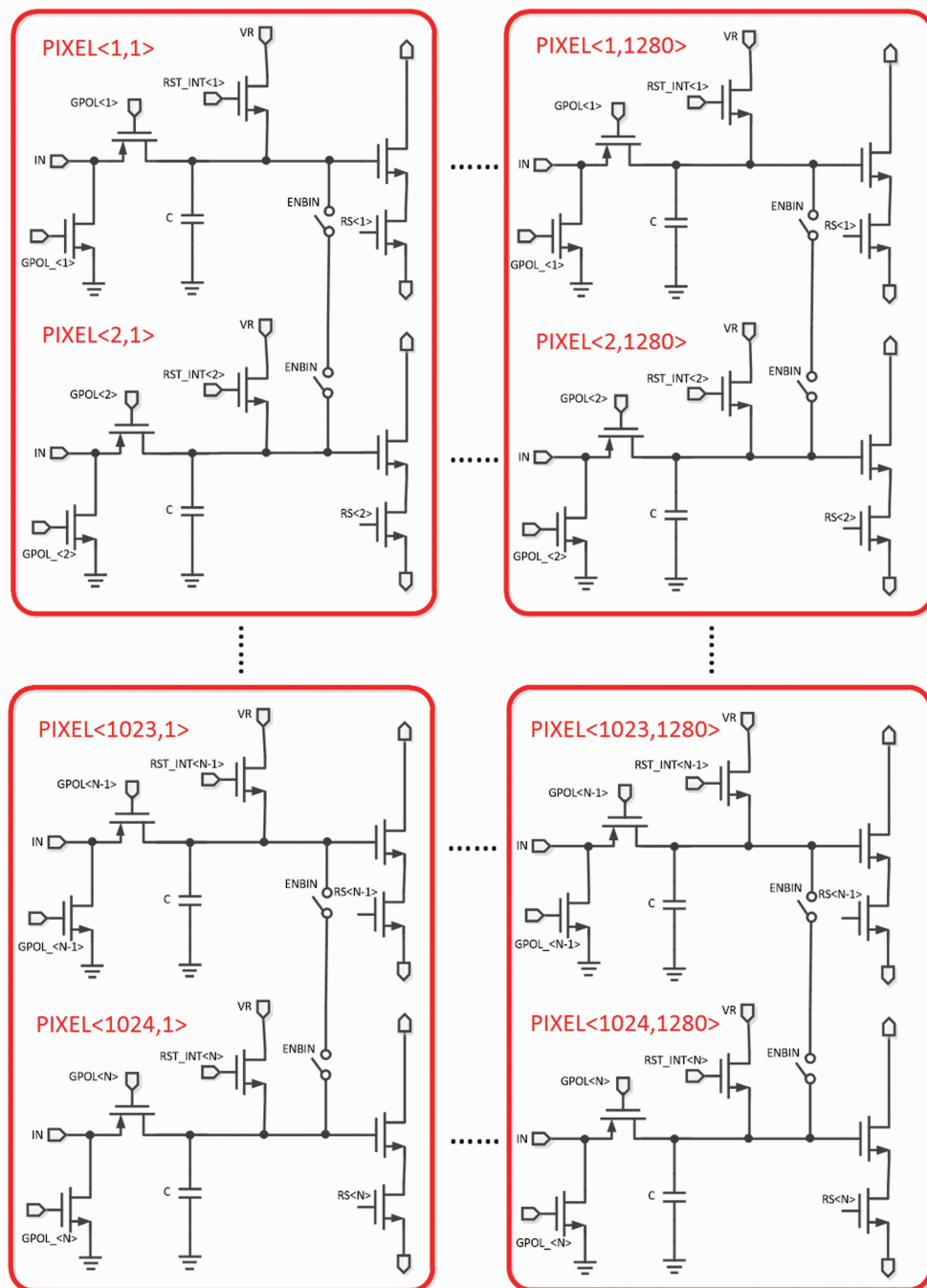


图 1 像素级积分电容复用的示意图

于实现像素的不同工作模式。其中, ENBIN 信号用于控制积分电容合并开关, GPOL 和 GPOL_ 用于控制是否进行积分, RST_INT 为复位控制信号, RS 为行选信号。

不同工作模式下像素内部的时序信号控制可描述如下: 在快照积分模式下, ENBIN 置为无效, 每组像素之间的连接断开, 电路不进行积分电容复用; 所有行的 GPOL 均有效,

RST_INT 复位时间内有效, RS 按行顺序依次有效, 一帧可以读出阵列的所有信息。在积分电容复用模式下, ENBIN 置为有效, 每组像素通过开关连接; 每组像素中仅有一个像素的 GPOL 有效, GPOL 信号有效的像素 GPOL_ 信号无效, 能够进行积分, 另外一个像素的 GPOL 信号无效, 像素不进行积分; GPOL_ 信号有效, 此时由 GPOL_ 控制的 MOS 管将会

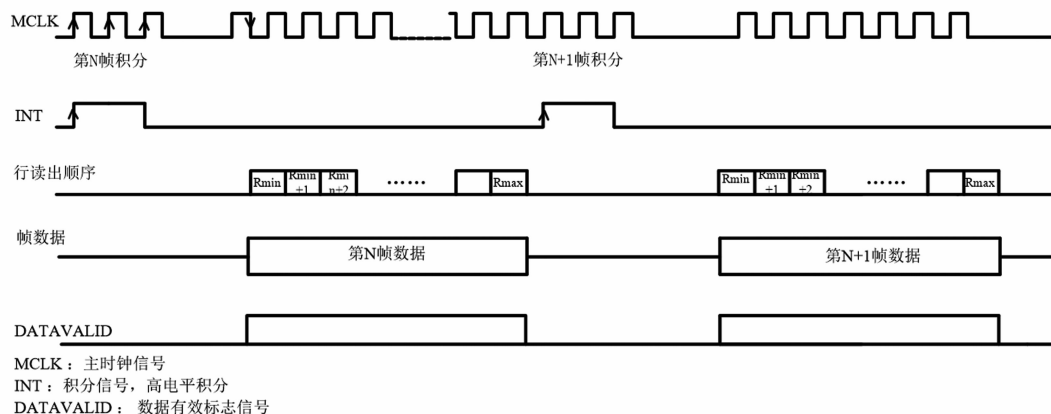


图 3 默认模式下读出电路的工作时序示意图

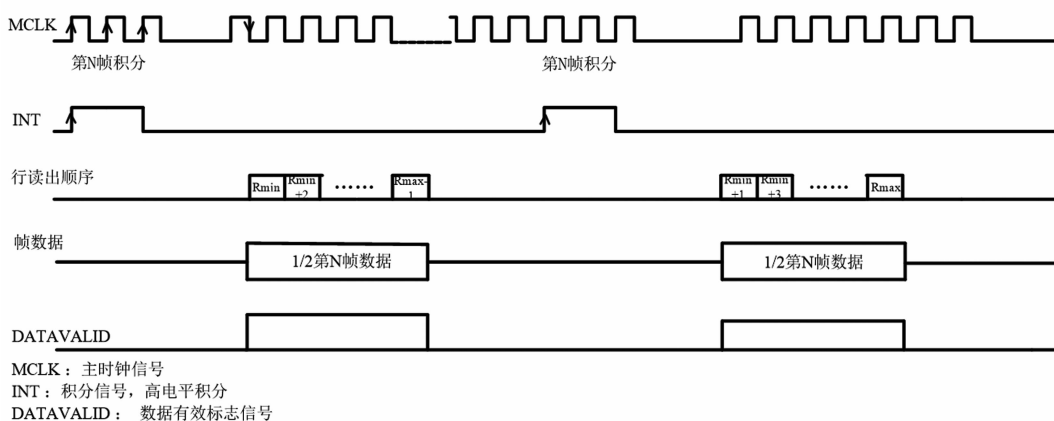


图 4 积分电容复用模式下读出电路的工作时序示意图

分。POLAR_E 有效时, 所有偶行像素积分, 奇行像素不积分。最后设计行、列译码器。相对于默认模式, 积分电容合并模式下, 列级工作模式没有改动, 因此列译码器无需用控制字进行控制。行译码器在 INTERLACE 为 0 时, 产生的所有行选信号依次有效。在 INTERLACE 不为 0 时, 控制信号 FRAME_O 和 FRAME_E 按子帧顺序交替有效。此时, 行选信号隔行有效, 在一个子帧内所有奇行的行选控制信号依次有效, 接着一个子帧中所有偶行的行选控制信号依次有效。

2 积分复用功能对帧频及灵敏度的影响

2.1 积分复用功能对帧频的影响

默认模式下, 读出电路的工作时序如图 3 所示。第 N 帧数据积分完成后进行第 N 帧数据的读出, 第 N 帧数据读出完成后进行第 $N+1$ 帧数据的积分。

积分电容复用模式下读出电路的工作时序如图 4 所示。第一次进行第 N 帧数据积分时, 阵列中所有的奇行像素进行积分, 积分完成后进行所有奇行像素的读出, 构成 $1/2$ 的第 N 帧数据。第二次进行第 N 帧数据积分时, 阵列中所有的偶行像素进行积分, 积分完成后进行所有偶行像素的读出, 构成另外 $1/2$ 的第 N 帧数据。两次读出的数据共同构成一个完整的第 N 帧数据。

通过上述分析可知, 读出一个完整的帧信号时, 默认模式和积分电容复用模式读出的像素个数是相同的。因此, 这两种工作模式的读出时间是相同的。但相比于默认模式, 积分电容复用模式多了一次积分过程。在忽略空闲时间的条件下, 帧周期约等于读出时间加上积分时间, 积分电容复用模式下的帧周期多出了一个积分时间。但由于长波红外探测器的积分时间很短, 相比于读出时间可以忽略不计。因此



图 5 隔行功能仿真结果

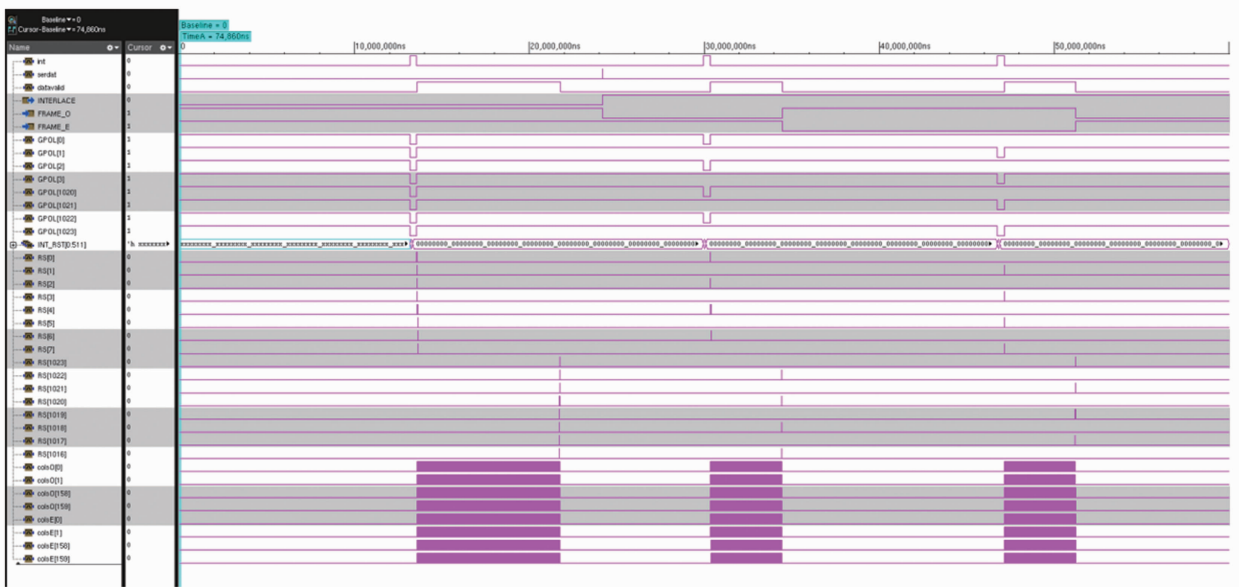


图 6 隔行偏置功能仿真结果

应用于长波红外探测器时，积分电容复用功能对帧频的影响非常小。

2.2 像元合并对提高灵敏度的影响

读出电路的灵敏度可以用噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 这一指标来进行衡量。NETD 用于描述受信噪比要求限制的分辨率。这一指标的数值越低，则代表探测器的灵敏度越高。用于计算 NETD 的表达式为^[4]

$$NETD = \frac{\Delta T}{SNR} \quad (1)$$

式中， ΔT 表示需要探测的目标以及目标所在的背景之间的温度差异， SNR 表示信噪比。一般来说，需要探测的目标以及周围环境之间的温度差异是无法控制的。因此，必须提高信噪比以降低 NETD，从而提高探测器的灵敏度。

探测器的信噪比取决于探测器的信号值和噪声值，其能够达到的最大值可以根据式(2)进行计算^[5]：

$$SNR_{max} = \frac{Signal_{max}}{Noise} = \sqrt{\sigma_{well}} \quad (2)$$

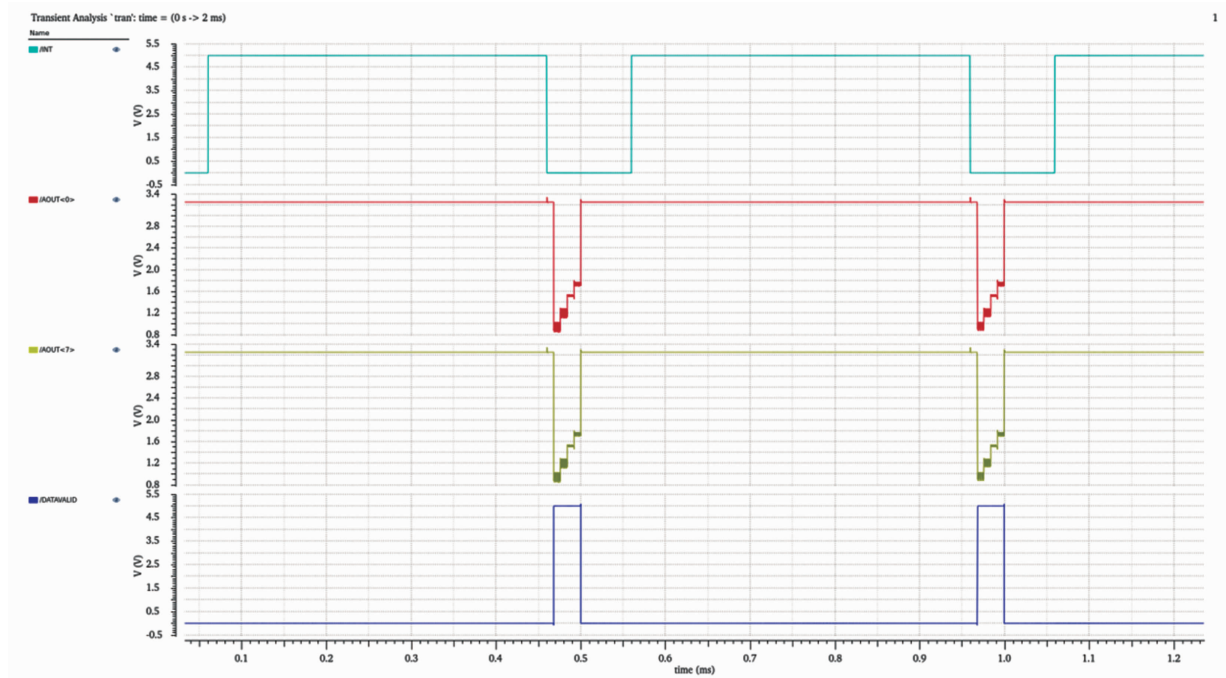


图 7 1280×4 默认模式下的全电路仿真结果

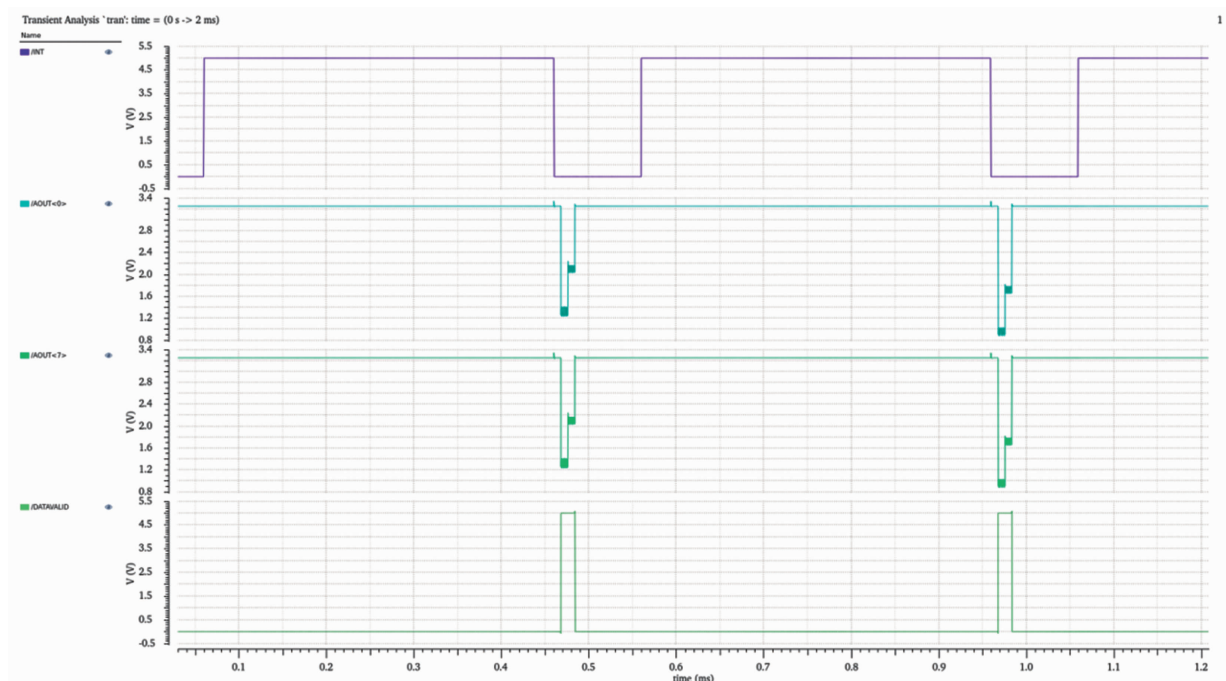


图 8 1280×4 积分电容复用模式下的全电路仿真结果

式中, $\sqrt{\sigma_{well}}$ 代表当读出电路处于满阱条件下可以实现的最大电荷处理量。通过上述公式可知, 增加读出电路的信噪比需要提高读出电路在满阱条件下的电荷处理能力。

在积分复用模式下, 阵列的等效积分电容变为默认模式下的两倍。因此, 积分电容复用

模式下的电荷处理能力也会提升为默认模式下的两倍。这意味着采用积分电容复用功能后可将长波红外探测器的 NETD 值降低 $\sqrt{2}$ 倍。

3 仿真结果

本节将给出数字电路及全电路模块的仿真结果。由于全电路规模过大, 难以对全阵列进

行仿真,因此需要开窗,将阵列规模缩小进行仿真,用于验证全电路功能。

3.1 数字电路仿真结果

电路默认状态为不进行积分电容复用、全阵列偏置、8 通道输出、全阵列 1280×1024 模式。积分电容复用实现的两个前提是电路可以实现隔行读出以及隔行偏置功能。在第一帧结束、第二帧开始之前,通过写入控制字对默认模式进行更改,并通过对不同模式进行仿真来验证数字电路的功能。

3.1.1 隔行功能仿真验证

通过控制字将电路工作模式改为隔行读出,其余模式不变。仿真结果如图 5 所示。可以看出,第二帧所有奇行的行选信号 RS 有效,所有偶行的行选信号 RS 无效;第三帧所有奇行的行选信号 RS 无效,所有偶行的行选信号 RS 有效;数据有效位 DATAVALID 高电平宽度变为默认模式下的 $1/2$,表明隔行功能有效。

3.1.2 隔行偏置功能仿真验证

通过控制字将电路隔行功能、隔行偏置功能设为有效,其余模式不变。仿真结果如图 6 所示。可以看出,第二帧所有奇行的 GPOL 信号有效,所有偶行的 GPOL 信号无效;第三帧所有奇行的 GPOL 信号无效,所有偶行的 GPOL 信号有效,表明隔行偏置功能有效。

3.2 全电路仿真结果

下面将给出全电路模块的仿真结果。由于电路规模过大,若对全阵列进行仿真,则耗时非常长。因此,采取开窗的方式进行全电路仿真。将电路的阵列规模设置为 1280×4 ,在 4 行像元的输入端注入不同的电流,以验证电路功能。

图 7 给出了读出电路默认模式下的全电路仿真结果。第 1 行至第 4 行输入端的电流分别为 0、1 nA、2 nA 和 3 nA,复位电平为 1 V。输出端每行的信号变化量分别为 0、0.25 V、0.5 V 和 0.75 V。

图 8 给出了读出电路 1280×4 积分电容复

用模式下的全电路仿真结果。第 1 行至第 4 行输入端的电流分别为 0、3 nA、6 nA 和 9 nA,复位电平为 1 V。仿真时,在第一帧开始之前写入控制字,将读出电路工作模式从默认模式改为积分电容复用模式。按照本电路的设计,读出顺序应为第 1 帧读出第 2 行和第 4 行,第 2 帧读出第 1 行和第 3 行。仿真结果表明,输出端读出的电平值相对于复位电平的电压变化量依次为 0.375 V、1.125 V、0 V 和 0.75 V,对应的积分电流为 3 nA、9 nA、0 和 6 nA。

在同样的积分时间条件下,积分电容复用模式下的注入电流为默认模式下的 3 倍。由于积分电容复用模式下的电容为默认模式下的 2 倍,因此其相应的信号变化量应为默认模式下的 1.5 倍。以上理论分析结果与仿真值相符,证明了积分电容复用功能的有效性。

4 结束语

本文提出了一种积分电容复用技术并将其应用到了一款像元中心间距为 $15 \mu\text{m}$ 的 1280×1024 长波红外读出电路中。通过该技术可将像素的积分电容提升至常规模式下的 2 倍,从而有效提升长波红外探测器的电荷处理能力,实现更高的灵敏度。相比于通常使用叠层电容来提高电荷处理能力的方法,本文提出的积分电容复用技术在使用上可以更加灵活,不会受到工艺限制。同时,该技术能够与叠层电容方法同时使用,使电荷处理能力得到更大程度的提升。由于本文提出的积分电容复用技术仅采用两个像素相互复用,因此其电荷处理能力会变成默认模式下的 2 倍。在接下来的研究过程中,将会探究如何实现更多像素的相互复用,从而获得更大的电荷处理能力。

参考文献

- [1] 姚立斌,陈楠. 高性能低噪声数字读出电路[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 83–92.
- [2] 刘晓磊,喻松林. 长波红外焦平面读出电路设计分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 119–122.

(下转第 22 页)

- [5] IEEE. IEEE Standard for Low-Voltage Differential Signals (LVDS) for Scalable Coherent Interface (SCI): IEEE Std 1596.3 [S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996.
- [6] Boni A, Pierazzi A, Vecchi D. LVDS I/O Interface for Gb/s-per-pin Operation in 0.35- μm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, **36**(4): 706–711.

- [7] Fan K X, Xu G H, Xu Y, et al. Design of a High Performance Low Voltage Differential Signal Receiver [C]. Singapore: 5th International Conference on Electronics, Communications and Networks, 2016.

(上接第 14 页)

- [3] 翟永成, 丁瑞军. 320×256 大电荷容量的长波红外读出电路结构设计 [J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(9): 80–85.
- [4] 袁媛, 王静, 李冬冰. 甚高灵敏度红外探测器

读出电路实现方法研究 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(6): 714–719.

- [5] 陈斌, 李立华, 梁艳, 等. 甚高灵敏度红外探测器读出电路研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(1): 100–106.