

一种 CMOS 图像传感器 4T-APS 像素电路线性化技术

闻 超, 韩本光, 汪西虎, 郭仲杰

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 传统 CMOS 图像传感器 4T-APS 像素电路中源跟随器阈值电压随源极电压发生变化, 导致源跟随器输入输出电压之间较大的非线性, 严重影响传感器的成像质量. 提出了一种像素电路线性化技术, 在不改变像素的填充因子的前提下, 对像元电路中源极跟随器引入的非线性进行了校正. 经仿真验证, 传统源跟随器输出误差达 205.9 mV, 线性化技术产生的误差不到 300 μ V.

关键词: 4T-APS 像素; 体效应; 源跟随器; 线性化

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)02-0031-03

A Linearization Method for 4T-APS Pixel Circuit in CMOS Image Sensor

WEN Chao, HAN Ben-guang, WANG Xi-hu, GUO Zhong-jie

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the conventional 4T-APS pixel circuit of CMOS image sensor the threshold voltage of source follower varies with the source voltage, and that results in the nonlinearity of the input-output characteristic, which will have a severe effect on the image quality. This paper proposes a linearization method for pixel circuit which corrects the nonlinearity of the source follower in the pixel circuit without effecting the fill factor of the pixel. The simulation suggests that the output error of the conventional source follower is 205.9 mV, while the output error of the proposed one is no more than 300 μ V.

Key words: 4T-APS pixel; body effect; source follower; linearization

1 引言

图像传感器是现代电子成像系统的核心, 主要有电荷耦合器件 (CCD) 及 CMOS 图像传感器两种. CMOS 图像传感器由于其集成度高、体积小、功耗低等优点, 使得 CMOS 图像传感器逐步取代了 CCD 图像传感器.

在机器视觉、医学影像、空间探测等领域, CMOS 图像传感器捕捉到的光强被用来指示某种物质或组织的量^[1], 图像系统要求高线性度以及宽动态范围. N 型有源像素电路以其较高的填充率被广泛用作 CMOS 图像传感器的像素阵列. 然而大多数 CMOS 工艺为 P 型衬底 N 阱工艺, N 型有源像素电路中源跟随器的体电位必须接地, 由于体效应导致 NMOS 做源跟随器其阈值电压在不同入射光强下发

生变化, 像素输出电压产生较大的非线性, 严重影响了 CMOS 图像传感器的成像质量. 针对以上问题, 本文提出了一种用于 4T-APS 像素电路中的线性化技术, 避免了源跟随器的阈值电压变化对输出的影响, 提高了 CMOS 图像传感器的线性度^[2].

2 4T-APS 像素电路结构及线性化技术

2.1 4T-APS 像素电路结构

4T-APS 像素电路结构如图 1(a) 所示, 该结构由 pinned 光电二极管 (Pinned-Photodiode, PPD), 传输管 M_{TX} 、复位管 M_{RST} 、源极跟随器 M_{SF} 以及行选管 M_{SEL} 组成. 这种 4T-APS 像素电路结构的特点在于 pinned 型有源像素支持相关双采样, M_{TX} 管可以有效降低像素的热噪声与暗电流, 源极跟随器 M_{SF} 起到一个缓冲放大的作用, 使得具有较大寄生电容的

列总线以及后级读出电路与像素内部敏感节点隔离开,因而 4T-APS 像素结构能应用于大面阵 CMOS 图像传感器中。

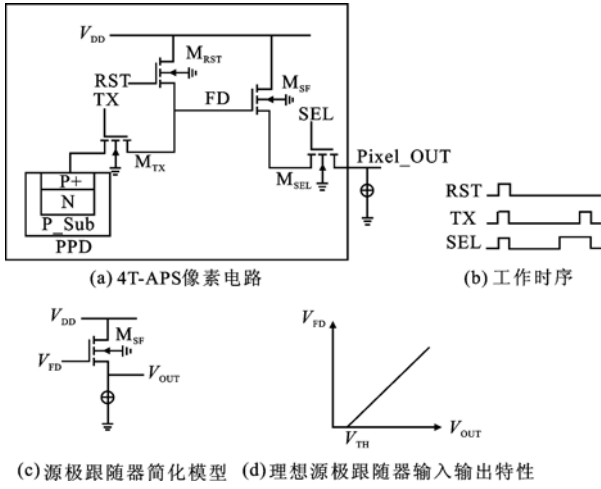


图1 4T-APS 像素电路结构、工作时序、源极跟随器简化模型及理想源极跟随器输入输出特性

4T-APS 像素的工作时序如图 1(b) 所示,可分为复位、积分、转移三个阶段。在复位阶段,复位信号 $RST = 1$, $TX = 1$, 复位管 M_{RST} 及传输管 M_{TX} 管导通, FD 点完成复位, PPD 发生钳位, 为收集光生电荷做准备; 在积分阶段, $RST = 0$, $TX = 0$, 复位管 M_{RST} 及 M_{TX} 管关断, 光生电荷被 PPD 收集, $SEL = 1$, 行选通管 M_{SEL} 打开, FD 点的复位信号通过源极跟随器 M_{SF} 输出到列线上, 即复位阶段的像素输出电压; 在转移阶段, $TX = 1$, 传输管 M_{TX} 管导通, PPD 积累的光生电荷被转移到 FD 点, 电荷信号转换为电压信号, FD 点的电压(积分阶段的电压)再次通过源极跟随器 M_{SF} 输出到列线上。

理想状态下,忽略行选通管 M_{SEL} 引起的源漏电压损失,4T-APS 像素中源极跟随器简化模型如图 1(c) 所示,如果不考虑体效应引起的阈值电压变化,源极跟随器 M_{SF} 的输出端电压 V_{OUT} 线性跟随 FD 点电压变化,如图 1(d) 中所示,这样前后两次输出到列线上的电压差就等于 FD 点两次电压差,然而由于 MOS 器件的体效应,前后两次 V_{OUT} 电压不同,根据式(2),源极跟随器 M_{SF} 的阈值电压 V_{TH0} 与 V_{SB} 有关^[3],而 $V_{SB} = V_{OUT}$ 。

$$V_{TH} = V_{TH0} + \gamma(\sqrt{|2\Phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|2\Phi_F|}) \quad (1)$$

$$V_{OUT} = V_{FD} - V_{TH} - V_{OD} \quad (2)$$

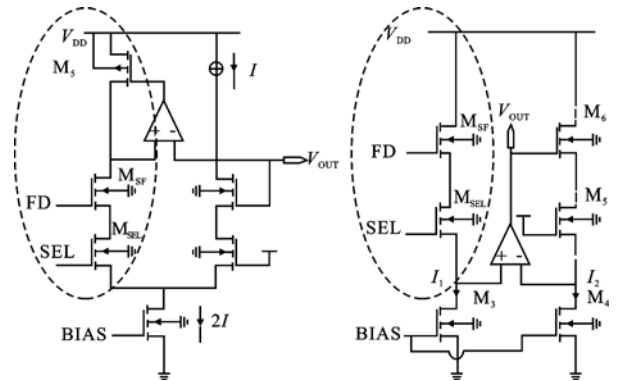
式中, V_{TH0} 为 $V_{SB} = 0$ 时的阈值电压, Φ_F 与 MOS 工艺有关, V_{OD} 为源极跟随器 M_{SF} 的过驱动电压,在偏置

电流不变时为一定值, γ 是体效应系数。

$$\Delta V_{OUT} = V_{OUT1} - V_{OUT2} = \Delta V_{FD} - \Delta V_{TH} = \Delta V_{FD} - \gamma(\sqrt{|2\Phi_F + V_{OUT1}|} - \sqrt{|2\Phi_F + V_{OUT2}|}) \quad (3)$$

式中, ΔV_{FD} 是复位阶段与积分阶段的 FD 点电压差值, V_{OUT1} , V_{OUT2} 分别对应复位阶段、积分阶段源极跟随器的输出电压, ΔV_{OUT} 是两次源极跟随器输出电压差值,从式(3)可以看出, FD 点电压差值越大, ΔV_{OUT} 越大,式(3)中与体效应相关的非线性误差部分 $\gamma(\sqrt{|2\Phi_F + V_{OUT1}|} - \sqrt{|2\Phi_F + V_{OUT2}|})$ 越大,这严重影响了 CMOS 图像传感器的动态范围以及线性度,使得成像质量下降。

为了提高图像传感器的成像质量,需要对像素电路中源极跟随器引入的非线性进行校正,即使输出电压线性跟随 FD 点电压变化, Morteza 等人的专利^[4]中提出了一种非线性校正方法,如图 2(a) 所示,其中虚线为像元部分,通过增加一个运放、一个电流源、一个电流沉以及两个匹配管实现对每列像素非线性输出进行了校正,该方法实现输出端电压等于 FD 点电压,避免了源极跟随器的体效应引起的非线性输出,但该方法存在一些问题。首先,该方法需要电流源 I_1 与电流沉 I_2 精确匹配 ($I_1 = 2I_2$),这在工程上很难实现;其次, PMOS 管 M_5 的引入降低了像素单元的填充度, M_5 管与运放正向输入端、输出端的连线进一步减弱了感光单元的进光量,同时给版图的布局布线带来了麻烦,本文提出了一种新型的非线性校正方法,如图 2(b) 所示,与图 2(a) 中的方法相比,该方法所有增加的器件及连线均在像素电路中外,感光单元填充率不受影响,另外尾电流源 M_3 , M_4 均为 NMOS,在版图上可以布局在相近位置,实现良好的电流匹配性。



(a) 专利[4]中提出的结构 (b) 本文提出的结构

图2 非线性校正技术

2.2 线性化技术

图 2(b) 所示为本文提出的非线性校正电路及

其与像素的连接关系,其中 M_1, M_2, M_3 分别为像素单元的源极跟随器、行选通管、尾电流源管, M_6, M_5, M_4 分别与 M_1, M_2, M_3 尺寸相同,可看作一个左半边电路的“镜像”, M_5 管栅接高电平,与左边的行选通管 M_2 相匹配,非线性校正电路中运放正负输入端分别接尾电流管 M_3, M_4 的漏端,运放输出端与“镜像的源极跟随器” M_6 管相连,同时也是像素电路非线性校正后的输出,由于运放与 M_4, M_5 及 M_6 形成负反馈,使得运放正负输入端电压相等,尾电流管偏置电压相同,故左右两支路电流相等,电流大小分别为 I_1 和 I_2 , M_2 与 M_5 管工作在线性区,电压损失相同,这样源极跟随器 M_1 与“镜像的源极跟随器” M_6 具有相同的偏置电流以及源极电压,二者由于体效应引起的阈值电压变化也相同,使得 M_6 栅极电压即输出电压完全跟随 FD 点电压变化,不受阈值电压变化影响。

$$\begin{cases} I_1 = K_1 (V_{G1,RST} - V_{S1,RST} - V_{TH1,RST})^2 \\ I_1 = K_1 (V_{G1,SIG} - V_{S1,SIG} - V_{TH1,SIG})^2 \\ I_2 = K_2 (V_{G6,RST} - V_{S6,RST} - V_{TH6,RST})^2 \\ I_2 = K_2 (V_{G6,SIG} - V_{S6,SIG} - V_{TH6,SIG})^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_3$, $K_2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_4$, $V_{G1,RST}, V_{S1,RST}$ 分别为复位阶段源极跟随器 M_1 栅极与源极电压, $V_{G6,RST}, V_{S6,RST}$ 为复位阶段“镜像”的源极跟随器 M_6 管的栅极与源极电压, $V_{G1,SIG}, V_{S1,SIG}$ 为积分阶段源极跟随器 M_1 管的栅极与源极电压, $V_{G6,SIG}, V_{S6,SIG}$ 为积分阶段“镜像”的源极跟随器 M_6 管的栅极与源极电压, $V_{TH1,RST}, V_{TH1,SIG}$ 分别为复位阶段、积分阶段 M_1 的阈值电压, $V_{TH6,RST}, V_{TH6,SIG}$ 分别为复位阶段、积分阶段 M_6 的阈值电压,由式(4)可以得出:

$$\begin{cases} \Delta V_{FD} = V_{G1,RST} - V_{G1,SIG} = V_{S1,RST} - V_{S1,SIG} - (V_{TH1,RST} - V_{TH1,SIG}) \\ \Delta V_{OUT} = V_{G6,RST} - V_{G6,SIG} = V_{S6,RST} - V_{S6,SIG} - (V_{TH6,RST} - V_{TH6,SIG}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, ΔV_{FD} 是 FD 点复位阶段与积分阶段的电压差, ΔV_{OUT} 是线性化电路输出的复位与积分阶段的电压差,考虑到实际运放存在失调电压 V_{OS} ,这样 M_1 与 M_6 的源极电压始终存在一个偏差 V_{OS} 。

$$\begin{cases} V_{S1,RST} - V_{S6,RST} = V_{OS} \\ V_{S1,SIG} - V_{S6,SIG} = V_{OS} \end{cases} \quad (6)$$

结合式(1),可以得出:

$$\Delta V_{OUT} - \Delta V_{FD} = \gamma \left(\sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,RST}|} - \sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,SIG}|} \right) - \gamma \left(\sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,RST} - V_{OS}|} - \sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,RST} - V_{OS}|} \right) \quad (7)$$

从式(7)可以看出, $\gamma \left(\sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,RST}|} - \sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,SIG}|} \right)$ 为不采用线性化技术的输出误差,线性化技术中多了后一项 $\gamma \left(\sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,RST} - V_{OS}|} - \sqrt{|2\Phi_F + V_{S1,SIG} - V_{OS}|} \right)$,使得非线性误差大大减小。

3 仿真实验与分析

图3所示为线性化的验证结果,图3(a)表示对 FD 点进行直流扫描像素电路源极跟随器输出端电压(图3(a)中下方的曲线)与线性化电路输出端电压。从仿真结果可看出,线性化输出端电压几乎与 FD 点电压曲线重合。由于后级电路会进行相关双采样处理,即两次采样电压信号之差,故对 FD 点电压与源极跟随器输出电压、线性化电路输出电压做差进行分析,可以得到图3(b)~(c),在 FD 点电压从 1.3 V 到 3 V 变化过程中,源极跟随

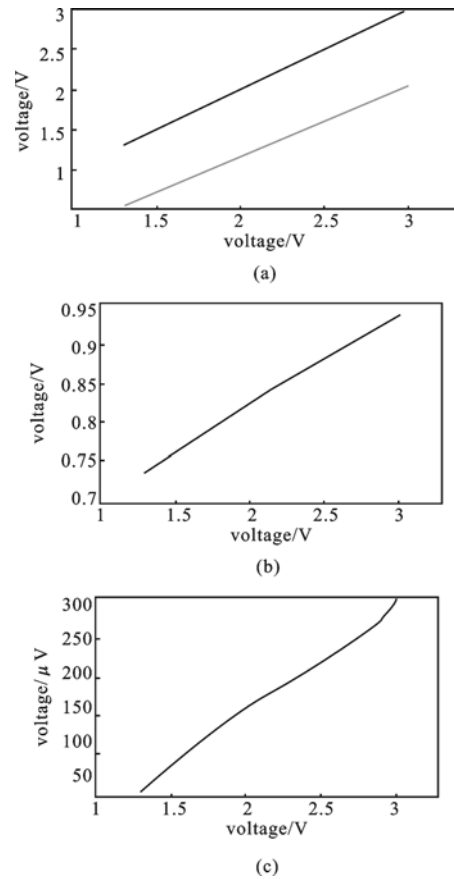


图3 仿真结果

(下转第38页)

- [4] Wang Z W, Sha KW, Lv W. Slight homomorphic signature for access controlling in cloud computing[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 73(1): 51-61.
- [5] Lee S, Kim T R, Lee H J. Mutual authentication scheme for cloud computing[C]// 2013 International Conference on Future Information and Communication Engineering. China, Shenyang, 2013:149-157.
- [6] Hang T, Zhang Z Y, Chen Q L, et al. A method for trusted usage control over digital contents based on cloud computing[J]. International Journal of Digital Content Technology and its Application, 2013, 7(4):795-802.
- [7] Xiao Y L, Wang Y M, Pang L J. Verification of trusted network access protocols in three strand space mode[J]. IEICE transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2012, E95-A(3): 665-668.
- [8] Song W T, Hu B. Approach to detection type-flaw attacks based on extended strand spaces[J]. The Computer Journal, 2014(29):84-106.
- [9] Choudhury A J, Kumar P, Sain M, et al. A strong user authentication framework for cloud computing[C]// 2011 IEEE Asia-Pacific Services, Computing Conference. Jeju Island, Korea, 2011:110-115.

作者简介:

常亚楠 女, (1989-) 硕士研究生. 研究方向为云计算安全与可信计算. E-mail: givechangyanan11@163.com.

张志勇 男, (1975-) 博士后, 硕士生导师. 研究方向为多媒体云计算、可信计算与可信网络连接、数字版权管理等.

韩林茜 女, (1989-) 硕士研究生. 研究方向为多媒体社交网络与云计算安全.

(上接第 33 页)

器的输出误差 205.9 mV, 线性化输出的误差约 300 μ V, 远远小于前者.

4 结束语

本文分析了传统 4T-APS 像素电路中源极跟随器输出的非线性, 提出了一种新的 CMOS 图像传感器中 4T-APS 线性化技术, 结构简单, 易于实现, 相对于文献[4]的方法, 本方法减少了感光阵列向外的金属布线, 避免了填充率下降, 保证了像元量子效率, 从仿真结果看, 线性化技术处理后输出误差从 205.9 mV 降低到 300 μ V, 从而保证了 CMOS 图像传感器成像质量, 因此可应用于高精度 CMOS 图像传感器中.

参考文献:

- [1] 袁杰, 陈浩洋. 提高 CMOS 图像传感器动态范围和线性度的装置和方法: 中国, CN10800837A[P]. 2010.
- [2] 陈雷, 韩泽耀, 曹庆红. 基于 4T 像素结构的 CMOS 图像传感器设计[J]. 电子科技, 2007, 25(10): 57-63.
- [3] 拉扎维, 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿, 程军, 张瑞智, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [4] Morteza Afghahi, Tempe, Ariz imaging system with gain and error correction circuitry: USA Patent, US006111242A[P]. 2000.

作者简介:

闻超 男, (1990-) 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计. E-mail: 1002361761@163.com.