光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.009

长线列 CMOS 图像传感器的性能优化设计

徐　星*，陈永平，陈世军，袁红辉，王　欣

（中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083）

摘　要： 设计了一种基于电容反馈跨阻放大器(CTIA)的长线列 CMOS 图像传感器。为减小器件功耗和面积，采用基于单端四管共源共栅运算放大器。为提高信号读出速率，采用没有体效应的 PMOS 源跟随器，同时减小 PMOS 管的宽长比，有效减小了输出总线寄生电容的影响。在版图设计上，采用顶层金属走线，降低寄生电阻和电容，提高了长线列 CMOS 图像传感器的读出速率和输出线性范围。采用 0.35 μm 3.3 V 标准 CMOS 工艺对传感器进行流片，得到器件像元阵列为 5×1 030，像元尺寸为 20 μm×20 μm。测试结果表明：该传感器在积分时间为 1 ms、读出速率为 4 MHz 的情况下工作稳定，其线性度达到 98%，线性动态范围为 76 dB。

关键词： CMOS 图像传感器；电容反馈跨阻放大器；体效应；读出速率；寄生电容

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0052－05

Performance Optimization of Long Linear Array CMOS Image Sensor

XU Xing, CHEN Yongping, CHEN Shijun, YUAN Honghui, WANG Xin

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: A kind of long linear array CMOS image sensor based on the capacitors trans-impedance amplifier (CTIA) is designed. A single-ended four transistors cascade operational amplifier is employed for eliminating the power dissipation and area. In order to promote the signal readout ratio, a minimized PMOS source follower without body effect is designed. The effect of the parasitic capacitance of the output bus is reduced. On the layout, the top metal is used to reduce parasitic resistance and capacitance. The signal readout ratio and the linearity range are raised. The image sensor chip with the pixel array of 5×1 030 and the pixel size of 20 μm×20 μm is fabricated with 0.35 μm standard CMOS process. Test results show that the image sensor works well when the integration time is 1ms and the readout ratio is 4 MHz. The linearity can reach up to 98% and the linearity of dynamic range is 76 dB.

Key words: CMOS image sensor; CTIA; body effect; readout ratio; parasitic capacitance

0　引言

根据 CMOS 图像传感器芯片中像素排列的结构可以将其分为面阵型图像传感器和线阵型图像传感器。面阵型图像传感器通过二维面阵形式排列的像素对物体直接拍摄来获取二维图像信息，每次曝光获得一帧完整的图像。线阵型图像传感器通过一维线阵排列的像素对物体以扫描的形式进行拍摄，每次曝光获取一行图像信息，然后将多行扫描曝光的结果进行拼接来获取完整的二维图像信息。线阵型图像传感器虽然不能直接输出二维图像，但其成本较低，制备方法成熟，经过拼接可以达到上千像元的线阵，且大都安装在飞机或卫星遥感平台上，在推扫式运动中可以获得高分辨率的图像，故特别适用

收稿日期：2020－11－17.

*通信作者：徐　星　E-mail：starxu2004@163.com

于航空航天、工业控制和医疗领域[1]。读出电路芯片的作用是收集探测器阵列二极管的光电流，通过将收集的电荷进行积分、放大和顺序读出转化为系统能识别的电信号。

本文详细介绍了 20 μm×20 μm，5×1 030 像元 CMOS 图像传感器的设计。设计基于 0.35 μm 3.3 V 标准 CMOS 工艺，输入级采用电容反馈跨阻放大电路结构(CTIA)，可提供恒定的偏置电压，具有较高的注入效率和转换增益[2]，有效减小了器件功耗和面积。采样保持电路中的信号通过模拟数据缓冲器输出，为了实现前后级的隔离、提高驱动能力，需要两级数据缓冲器，即每个像元的输出缓冲器和行总线缓冲器。而对于小像元长线列器件来说，每个像元的输出缓冲器受面积和功耗的限制，同时它是总线上寄生电容的主要来源，它的选择决定了信号最终的读出速度和线性度。本文采用无体效应的 PMOS 管跟随器，以有效减小总线的寄生电容，在保持驱动能力不变的情况下，使读出信号速率由原来的 2 MHz 提高到 4 MHz，且可以消除体效应引起的非线性。

1　读出电路系统架构

本文采用的电路结构如图 1 所示，它由 CTIA 电路、相关双采样(CDS)电路、像元输出驱动电路和总线输出驱动电路组成。CTIA 型读出电路具有低噪声、积分电容可根据应用情况灵活设计、动态范围大、均匀性和线性度好等优势。CTIA 电路与 CDS 电路相互配合，可完成探测器输出电流向电压的转化。其工作模式为：通道内所有像素同时积分、同时复位，串行输出，积分与信号输出同时进行，即在同一脉冲控制下，所有像素同时复位后开始积分，积分完成后，所有像素的信号同时采样到各自的保持电路上，在下一帧积分的过程中，上一帧信号按顺序串行读出。图 2 为其工作时序图。积分周期内，光电流在积分电容 C_{int} 上积分，在积分完成之前，信号采样开关 S 对积分信号采样，周期结束后复位管 reset 将积分电容复位，复位采样开关 R 对复位信号采样。当读信号到来时(SEL 变为高)，数据输出缓冲器将 OUTS 积分信号输出和 OUTR 复位信号输出同时读出，经片外差分电路作差，消除同时存在于积分与复位信号上的固定模式噪声。

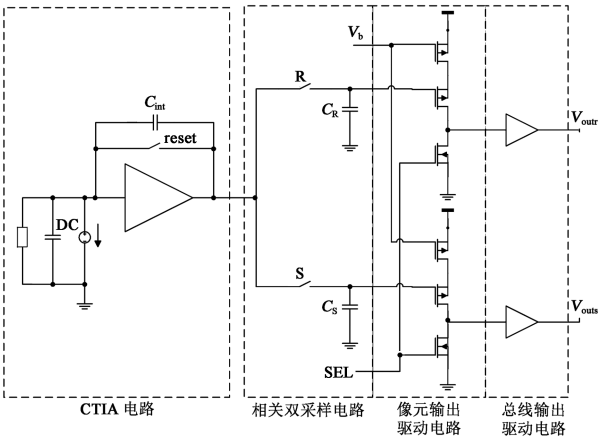


图 1　读出电路结构

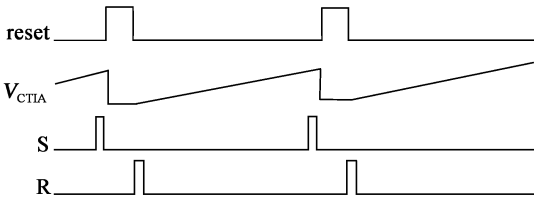


图 2　工作时序图

2　关键电路单元设计及仿真

2.1　电容反馈跨阻放大器

CTIA 读出电路由运算放大器、积分电容 C_{int} 和复位管 reset 组成。

当 reset 为低电平时，CTIA 处于积分状态，光电二极管光生电流 I_{in} 存储在积分电容 C_{int} 上，假定积分时间为 t，CTIA 输出的积分信号由式(1)表示：

$$V_{CTIA_sig}=\frac{A}{1+A}\left(V_{ref}+V_{os}+\frac{I_{in}\cdot t}{C_{int}}\right) \quad (1)$$

其中，A 为运放开环增益，V_{os} 为运放输入失调电压。

当 reset 为高电平时，CTIA 处于复位状态，由式(2)表示：

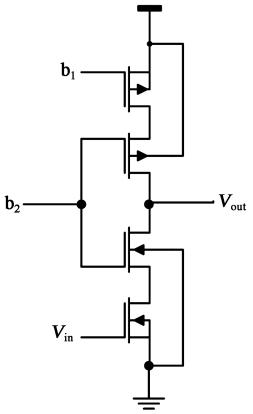
$$V_{CTIA_ref}=\frac{A}{1+A}(V_{ref}+V_{os}) \quad (2)$$

比较式(1)和(2)可知：运放的有限增益会降低输出信号的幅度，因此运算放大器必须有足够高的直流开环增益来保证其输入端“虚地”。

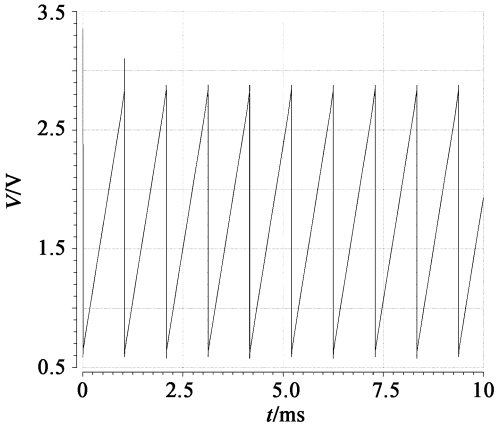
CTIA 结构中常用的积分放大器分为单端输入放大器和差分结构放大器两种，其中差分结构放大器引入的失调电压将直接影响光电二极管偏压的稳定性，差分运算放大器占用芯片面积大，影响像元的填充因子，而且其功耗相对也较大[3]。与传统的差分结构放大器相比，单端结构放大器所用 MOS 管数目少，版图占用面积小，大大提高了像元的有效占空比，并且只有一路直流通道，功耗低。随着日益缩

小的面积要求，单端型 CTIA 读出电路得到了广泛的应用[4]。

为减小像素的单元面积，本文 CTIA 电路结构中的放大器采用单端放大器，如图 3(a)所示，主放大器只有四个 MOS 管：两个 PMOS 管和两个 NMOS 管。为减小噪声，需尽量增加第一级放大器的跨导，因此采用较大宽长比的输入 MOS 管，本文放大器输入管的宽长比设计为 20 μm/1 μm[5]。单个放大器的功耗仅为 65 μW，可满足长线列对功耗的控制要求。图 3(b)为 CTIA 仿真输出，从图中可以看出输出电压在 0.65～2.8 V 都是线性的，输出线性范围达到了 2.15 V。



(a) 放大器结构



(b) 仿真输出

图 3 CTIA 放大器结构及其仿真输出

2.2 输出缓冲器

采样保持电路中的信号通过输出缓冲器输出，像元输出缓冲器除了增加驱动能力、实现前后级的隔离外，还具有列选功能。其设计主要应考虑跟随特性、线性度、驱动能力、面积、功耗等。常用的模拟数据缓冲器主要有两种结构，一是源随器结构，二是将运算放大器构成单位增益缓冲器。在本项目中，因为是长线列器件，1 030 元需要有 1 030 个输出缓冲器，所以将其寄生电容和面积作为主要考虑因素，选用高输入阻抗和中等输出阻抗的源随器。源随器结构简单，所用器件数目较少，占用面积较小，功耗也相对较低，其功能是完成电平的移动。在电平移动过程中，源随器消耗了电压余度 V_{gs}，因此，通常需要在源随器后面设计一个电压抬升或下降的电路[6]，如图 1 中总线输出驱动电路，以抵消源随器产生的电压消耗，改善输出摆幅。

传统的源随器采用 NMOS 管或 PMOS 管，如图 4 所示，在仿真过程中发现，长线列器件的寄生效应限制了读出速率的提高。采用宽长比较小的器件可以减小总线上的寄生电容，但同时会减弱驱动能力，致使读出速率只能达到 2 MHz。

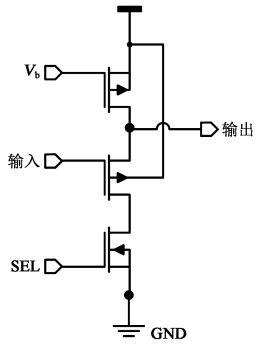


图 4 传统 PMOS 源跟随器

为了在不增加总线寄生电容的前提下提高驱动能力，采用把衬底和源接在一起的 PMOS 管，如图 5 所示，所有的 NMOS 管共用一个衬底，但是这样的方法通常仅对 PMOS 管有效。通过仿真发现，当宽长比为 6/0.35 时，有体效应的 PMOS 管与没有体效应的 PMOS 管相比，驱动能力并没有降低，而总线的寄生电容却由原来的 30 pF 减小到 15 pF，因此读出速度提高了一倍。

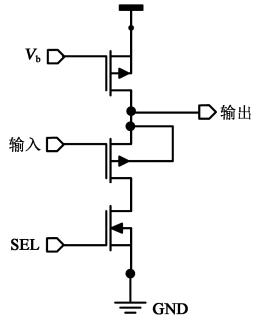


图 5 没有体效应的 PMOS 源跟随器

图 6 为两种 PMOS 管的读出速度比较，可以看

出，无体效应管的输出摆幅大于有体效应管的输出摆幅。采用没有体效应的 PMOS 管，可以消除由体效应引起的非线性。图 7 为两种 PMOS 源跟随器的直流特性扫描曲线，可以看出无体效应源跟随器的线性度要优于有体效应的源跟随器。

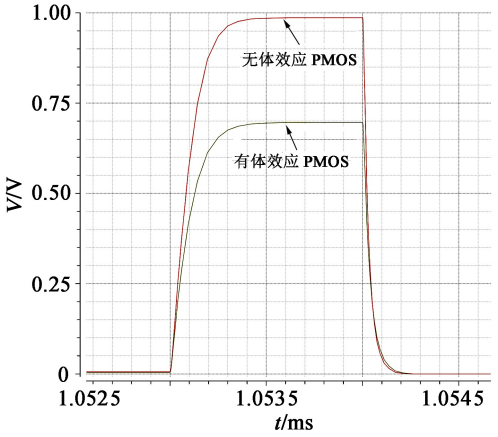


图 6　两种 PMOS 管读出速度比较

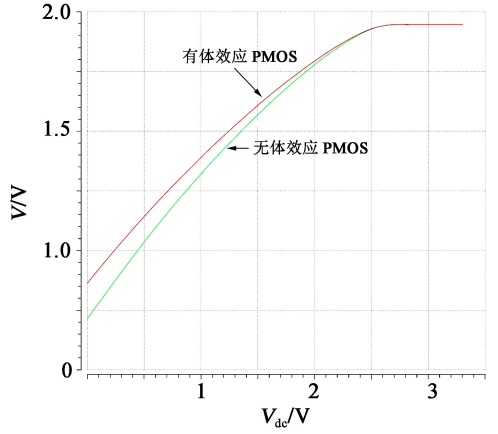


图 7　两种 PMOS 源跟随器的线性度比较

3　版图设计

本文采用标准 0.35 μm CMOS 工艺对电路进行仿真、版图设计和流片。随着像元数量的增多，版图设计尤为重要，设计时要综合考虑版图布局、尺寸要求、关键信号线间的隔离等，以尽量避免寄生引入干扰而影响信号的正常传输，同时应注意对敏感信号点的隔离[7]。

电源/地线布线优化：电源在芯片内部的压降与电源线寄生电阻有关。电源线采用铝金属层走线，寄生电阻与金属走线的宽度成反比，金属线越宽，寄生电阻越小。通过增加电源线金属层数，等效寄生电阻并联，可以降低寄生电阻。本文通过理论计算和版图布局权衡，采用将各模块的电源和地线进行加粗或加层的方法来降低寄生电阻[8]。

输出信号线的优化对信号的读出速度影响非常大，为了减小寄生电阻，采用顶层金属作为输出线，同时加宽输出信号线，以减小寄生电阻，但这又会增加寄生电容，因此只能在寄生电阻和寄生电容之间进行折衷，在本项目中取输出信号线宽度为 5 μm。图 8 为读出电路芯片的版图，整个芯片的面积是 21.9 mm×8.1 mm。

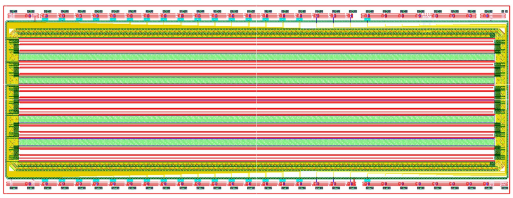


图 8　芯片整体版图

4　测试验证

4.1　功能测试

对芯片进行封装测试，在正常加载外驱动的情况下，时钟频率为 4 MHz，在示波器上看到输出信号随输入信号的变化而变化，表明该探测器功能正常。

4.2　速度测试

为了测试信号速度，采用小光点照亮某一元信号，进行下降延时的测量，测试结果如图 9 所示，在信号达到 600 mV 时，下降延时为 240 ns，达到 4 M 读出速率。

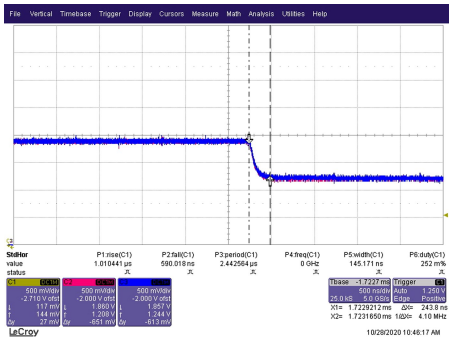


图 9　速度测试结果

4.3　线性度测试

器件在正常脉冲驱动下，通过调节积分球的光信号，读出探测器的电压信号。探测器实测曲线与拟合直线之间的最大偏差与线性范围输出电压的比值即为线性度。图 10 为线性度测试曲线，线性度为 98%，线性摆幅为 0.76 V，噪声为 0.12 mV，线性动态范围为 76 dB。

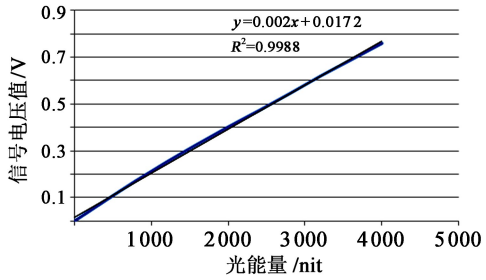


图 10 线性度测试曲线

5 结论

本文设计了一款长线列小像元 CMOS 图像传感器，像元尺寸为 20 μm×20 μm，阵列为 5×1 030，电路设计基于标准 0.35 μm 3.3 V 工艺。文章详细介绍了 CTIA 积分器的设计思路，采用单端放大器来减小器件功耗和面积；对于输出缓存器的设计，采用无体效应的 PMOS 源跟随器。仿真分析及芯片实测结果都证明采用无体效应的 PMOS 源跟随器寄生电容小，可有效提高信号的读出速率，且线性度好。通过优化版图，减小了寄生电阻和寄生电容的影响。经过流片测试验证，电路各项功能正常，器件在读出速率、线性度和摆幅方面都达到设计要求。

参考文献：

[1] 徐 敏，赵毅强，刘文娟，等. 基于长线列探测器的图像非均匀性研究与校正[J]. 传感器与微系统，2013，32(7)：15-17.
Xu Min，Zhao Yiqiang，Liu Wenjuan，et al. Research and correction of non-uniformity image based on long linear array detectors[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2013，32(7)：15-17.

[2] Xu Ruoyu，Yuan Jie. A 1/2.5 inch VGA 400 f/s CMOS image sensor with high sensitivity for machine vision[J]. IEEE J. Solid State Circuits，2014，49(10)：2342-2351.

[3] 李金洪，邹 梅. 低照度 CMOS 图像传感器设计与实现[J]. 红外与激光工程，2018，47(7)：0720002.
Li Jinhong，Zou Mei. Design and realization of low-light-level CMOS image sensor[J]. Infrared & Laser Engineering，2018，47(7)：0720002.

[4] 袁红辉. 一种单端输入的 CMOS 图像传感器设计[J]. 科学技术与工程，2011，32(11)：1671-1815.
Yuan Honghui. A design of a single-ended input CMOS image sensor[J]. Science Technology and Engineering，2011，32(11)：1671-1815.

[5] 袁红辉，陈永平，黄志伟，等. 一种四采样低噪声 CMOS 光电探测器读出电路[J]. 光电子，2019，9(2)：83-91.
Yuan Honghui，Chen Yongping，Huang Zhiwei，et al. Development of an optimized sampling readout circuit for CMOS detector[J]. Optoeletronics，2019，9(2)：83-91.

[6] 文 勇，刘思超，金友山，等. CTIA 型读出电路非线性的研究[J]. 激光与红外，2009，39(9)：978-981.
Wen Yong，Liu Sichao，Jin Youshan，et al. Investigation on the nonlinearity of CTIA readout circuit[J]. Laser & Infrared，2009，39(9)：978-981.

[7] 岳冬青，吉晶晶，宁 提，等. 小像元红外探测器读出电路设计[J]. 激光与红外，2019，49(9)：1130-1134.
Yue Dongqing，Ji Jingjing，Ning Ti，et al. Research on ROIC design of small pixel infrared detector[J]. Laser & Infrared，2019，49(9)：1130-1134.

[8] 王成刚，刘泽巍，袁 媛，等. 多谱段线列红外探测器读出电路设计优化[J]. 激光与红外，2019，47(6)：736-739.
Wang Chenggang，Liu Zewei，Yuan Yuan，et al. Optimization and design of ROIC for multispectral linear infrared detector array[J]. Laser & Infrared，2019，47(6)：736-739.

作者简介：

徐 星(1978—)，女，硕士，高级工程师，主要研究方向为 CMOS 图像传感器。

(上接第 19 页)

[44] Yu Liqiang，Lu Dan，Pan Biwei，et al. Widely tunable narrow-linewidth lasers using self-injection DBR lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2015，27(1)：51-53.

[45] Li Zhaosong，Lu Dan，He Yiming，et al. Improving the performance of narrow linewidth semiconductor laser through self-injection locking[C]// Proc. of IEEE Photon. Conf.，2017：655-656.

[46] Thompson D J，Scholten R E. Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter[J]. Rev. of Scientific Instruments，2012，83(2)：023107.

[47] 刘金玉，何 军，王军民. 852 nm 窄带滤光片外腔反馈半导体激光器的优化[J]. 量子光学学报，2018，24(1)：98-106.
Liu Jinyu，He Jun，Wang Junmin. Optimization of 852 nm external-cavity diode laser with narrow-bandwidth filter[J]. J. of Quantum Opt.，2018，24(1)：98-106.

作者简介：

花金平(1996—)，男，硕士生，主要研究方向为光纤传感技术、外腔半导体激光器；

江 毅(1967—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光纤传感技术。