光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023092203

CMOS探测器自适应信号读出技术研究

于得福[1]，陈永平[2*]，李向阳[2]

（1. 上海大学 微电子学院，上海 201800；2. 中国科学院上海技术物理研究所
中国科学院红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083）

摘　要： 设计了一种根据光照强度自动调节增益的CMOS探测器，它能够在一帧时间内实现光照强度与积分增益自动适应，从而实现无论在弱光还是强光条件下CMOS探测器都能有适应的灵敏度和动态范围。相较于传统CTIA电路，自适应信号读出技术新增了比较器电路来控制CTIA积分电容大小，通过短曝光输出电压与参考阈值进行比较，输出信号结果用来调整长曝光积分增益，最终得到每个像素的输出电压和增益挡位。基于0.5 μm 5 V-CMOS工艺进行了128×1线阵CMOS探测器设计仿真与流片，仿真结果表明，光电流在2 pA～100 nA六个数量级内分别自适应四个积分增益，都能有良好的信号读出。

关键词： CMOS探测器；自适应技术；自动增益；长短曝光

中图分类号： TN386.1　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0036－05

Adaptive Signal Readout Technology for CMOS Detectors

YU Defu[1], CHEN Yongping[2], LI Xiangyang[2]

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN;
2. Key Lab. of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: An adaptive CMOS detector that automatically adjusts gain based on light intensity was designed. The detector can automatically adjust the gain based on the intensity of light during integration, enabling adaptive sensitivity and dynamic range readouts in both low-light and high-light conditions. In this study, a new comparator circuit is introduced alongside the traditional CTIA circuit to control the size of the CTIA integration capacitor. By comparing the output voltage from short exposure with the reference threshold, the results are used to fine-tune the long exposure integration gain for each pixel. The design and simulation of a 128×1 linear array CMOS detector were conducted using 0.5 μm 5 V-CMOS technology. The simulation results demonstrate that the CMOS detector can adaptively adjust four different integration gains within a range of five orders of light intensity, covering photocurrents from 2 pA to 100 nA while maintaining excellent signal readout performance.

Key words: CMOS detector; adaptive technology; automatic gain; long and short exposure

0　引言

CMOS探测器是一种通过光电二极管与读出电路将光信号转化为电信号的光电器件[1]。表征CMOS探测器的性能参数通常包括动态范围、信噪比、灵敏度、填充效率、功耗[2]等，其中提升动态范围

收稿日期：2023－09－22.
基金项目：国家自然科学基金重大项目(42192582).
* **通信作者：**陈永平

是目前探测器主流的设计方向。然而，由于输出摆幅的限制，较大动态范围的探测器通常其灵敏度也会比较低，以避免饱和，当在应对弱光照射条件下的读出信号时会出现欠曝光现象，影响图像质量；较小动态范围的传感器则在应对强光照射条件下会出现过曝光现象，像素达到饱和。究其原因是在单一增益条件下，大动态范围与高灵敏度无法兼容。目前，CMOS 探测器在航空航天和科学仪器等领域得到了越来越重要的应用，在气象、海洋及高光谱遥感等应用中，探测器接收到的光强范围往往会跨越几个数量级[3]。为了得到良好的图像信号，CMOS 探测器不仅需要较大的动态范围，还需要较高的灵敏度。自适应信号读出技术使高动态范围和高灵敏度兼备的 CMOS 探测器成为可能，因此自适应信号读出技术研究有着非常重要的研究意义与发展前景。

CMOS 探测器自适应读出技术路线通常有以下几种[4]：(1)自适应积分时间，通过对不同光照强度自适应积分时间读出信号，由读出电压与积分时间确定光强信息；(2)自适应积分电流，通过自适应开关由不同输出函数输出信号得出光强信息；(3)自适应积分电压，由一帧内达到阈值后重置像素的次数和读出电压来确定光强信息；(4)自适应积分增益，通过控制积分电容大小实现不同增益挡位的调整，由读出电压与增益挡位来确定光强信息。以上几种方式都能够实现在较大动态范围内提升读出电路的灵敏度，从而得到更好的图像信息。

例如将阵列扫描电路设计成可编程电路，以最短曝光时间为单位多次采样并逐次输出信号与阈值比较，只有达到阈值时才重置像素电路[5]。这种自适应积分时间读出方式可以灵活调节曝光时间，然而在暗点较多时需要进行算法优化来解决在一帧内进行图像调整过程中造成部分图像信息丢失的问题。另外也可以在 3T-APS 读出电路基础上通过并联两条分流支路，NMOS 开关上设置阈值，当光电二极管电压低于阈值时开关打开，使像素积分增益下降[6]。这种自适应积分电流方式结构简单，功耗较低，但是噪声非常大，积分响应率匹配十分困难，需要严格调整版图的匹配。自适应积分增益路线可以在积分时间节点调节，可以在阈值电压节点调节增益，也可以在输出图像信息后调节增益。以最后一种方式为例，在 ADC 输出信号与 CTIA 读出信号之间增加控制算法与驱动，可以实现 CTIA 增益自适应调整[7]。电路在上一帧工作时输出数字信号与半个量程阈值比较，低于阈值则调整增大增益，反之不变。这种自适应积分增益方式在光电流变化较大时调整时间会较长，进而损失部分时段图像信息。

本文所设计的自适应信号读出技术是基于自动调节读出电路增益的方式在一帧图像内实时反映图像的读出信号与增益挡位，可应用全局曝光。设计的自适应增益通过短时间内曝光快速判断光电流大小，输出信号反馈回读出电路积分电容控制开关，实现了增益调整，随后在长时间曝光时以与光电流匹配的增益进行积分，最后输出积分电压与增益挡位信息，从而反映出图像信息。输入级电路考虑线性度要求采用了 CTIA 读出结构[8]，增益判断考虑速度要求采用了正反馈比较器结构，最后基于 0.5 μm 5 V-CMOS 工艺进行了仿真测试并设计 128×1 像素线阵。仿真结果表明该自适应读出技术在低、中、高三种照度的光照条件下都有很好的自适应信号读出。

1　自适应信号读出架构

如果一帧内整张图片区域各处光照强度有着显著区别，甚至有着几个数量级的差别，就需要对单个像素读出电路进行自适应信号读出设计，使得每个像素能够自动调整增益。整个电路从积分、判断到最后读出分为像素积分模块、信号判断模块、信号处理模块以及信号存储模块，如图 1 所示。首先是像素积分模块，该模块选用了 CTIA 电路，如图 2 所示，这是一个将光电二极管通过光照得到的电荷信号转化为电压信号的模块电路，CTIA 积分线性度更好，信号稳压能力强，积分增益简单，易于调节。在像素积分过程中，由于积分时间极短，大多低于 1 ms，可视为积分电流保持不变。其次是判断模块。判断模块的输入信号是短曝光后的信号，判断模块的输出信号是作为积分模块的增益调整输入信号，二者构成反馈关系；长曝光后的信号是最终积分电路在当前增益挡位下的实际输出信号，经过信号处理电路后被存储。信号存储电路短暂存储单个像素一帧内的积分电压信号和增益挡位信号，最终实际输出时由选通开关逐个输出到总线。

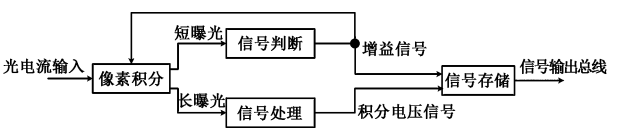


图 1　自适应信号读出架构

2 自适应读出电路设计

传统的 CTIA 积分电容控制开关由外部时序电路控制，而自适应读出电路控制开关由反馈信号控制。外部时序信号也能调整电容以适应各种光强信号，但这种调整只能根据上一帧的信号大小在下一帧进行调节，总是比图像慢一帧，无法实现实时调整。本文设计的自适应读出电路则是在片上实现，可在一帧内完成信号判断和增益调整，实现了一帧内实时地读出对入射光强的自适应信号，其电路图如图 2 所示。

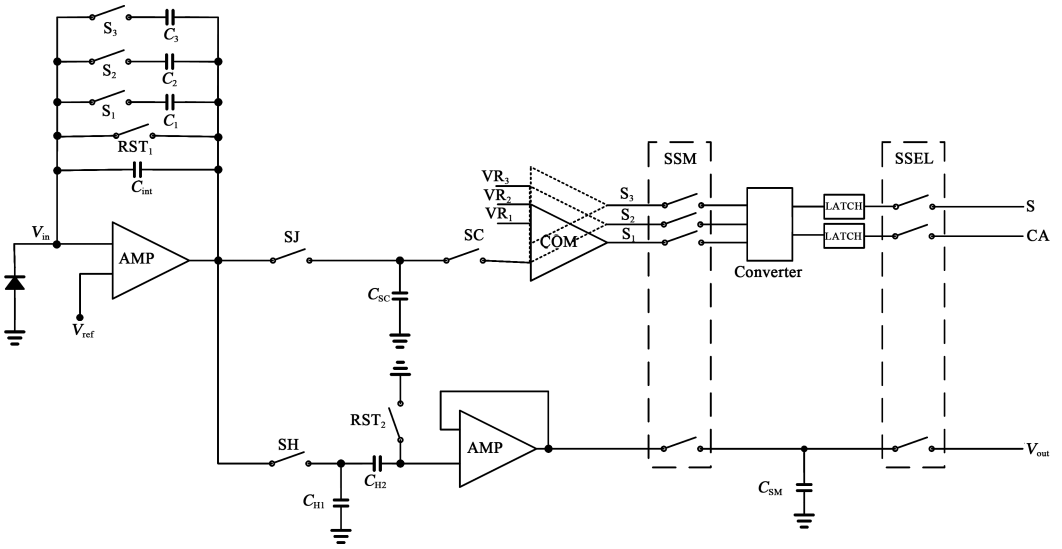


图 2 自适应信号读出电路

CTIA 积分电路的增益由积分电容决定，设计时使积分电容能够根据光照强度自适应调整容值大小就能实现自适应信号读出，光照强度的判断由最大增益条件下极短时间内的短曝光来实现，短曝光的输出信号反馈回 CTIA 积分控制环路，实现增益自适应调整。

自适应读出电路通过设定输入光电流与输出信号成线性关系，这样增益挡位决定比例系数，得到以下关系：

$$V_{\text{out}}=V_{\text{ref}}+\frac{I_{\text{in}}t}{C_{\text{int}}}=V_{\text{ref}}+A_{\text{V}}I_{\text{in}} \tag{1}$$

在相同的积分时间内，积分电容大小决定积分增益，通过一帧内自适应调节不同的积分电容可以达到不同的增益挡位，光电流在不同增益挡位下积分输出信号电压，最终由增益挡位和信号电压同时决定像素光强。

电路时序如图 3 所示，设定自适应信号读出周期为 115 μs，完整的信号读出需要经过短曝光和长曝光两个积分过程，前者信号用来调整积分增益和输出挡位，后者信号表征输出光强。在极短时间内的光照条件下，光电流可以视为保持稳定不变，两次曝光过程都包括复位和积分。

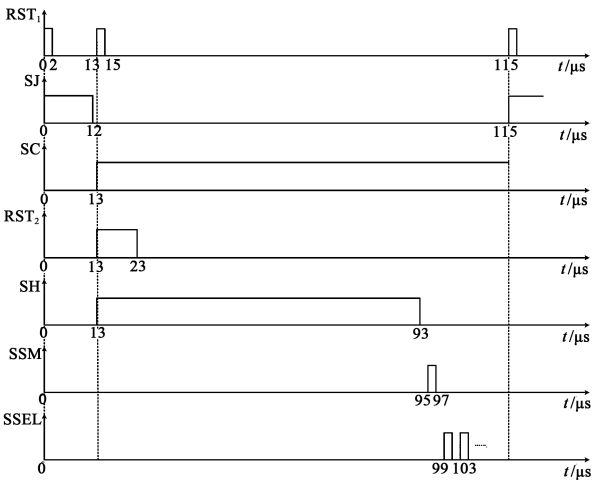


图 3 自适应信号读出电路时序图

首先是短曝光过程。复位开关 RST_1 在 $t=0$ 时刻进行复位，采样开关 SJ 打开，积分电容 C_{int} 两端电压和采样电容 C_{SC} 正端电压都为 V_{ref}，像素积分电路和判断电路重置；复位开关 RST_1 在 $t=2$ μs 时断开，像素读出电路在最大增益挡位（$C_{\text{adaptive_int}}=C_{\text{int}}$）下开始积分，采样电容 C_{SC} 采集到 10 μs 的积分电压后断开，随后比较开关 SC 在 $t=13$ μs 时闭合，采样电压与设定好的三个阈值电压同时进行比较，比较结果分别为 A_1，A_2 和 A_3，在 1 μs 内反馈回

CTIA 并调整好匹配的增益挡位。A_1，A_2 和 A_3 作为增益挡位信号在长曝光期间保持不变，以保证像素一直在不变增益挡位下长曝光，同时也作为存储模块数字输入端，被用于转化数码挡位信息输出。通过比较器快速判断和输出信号来进行积分增益的调整，可以达到在极短时间内自适应地改变 CTIA 的增益。

其次是长曝光过程。复位开关 RST_1 在 $t=13\ \mu s$ 时进行复位，采样开关 SH 和稳压复位开关 RST_2 打开，积分电容 C_{int} 两端电压和采样电容 C_{H1} 和 C_{H2} 正端电压都为 V_{ref}，负端电压都为 0，像素积分电路和相关双采样电路重置；复位开关 RST_1 在 $t=15\ \mu s$ 时断开，像素读出电路在自适应增益挡位下（$C_{adaptive_int}=C_{int}+A_1C_1+A_2C_2+A_3C_3$）开始积分，采样电容 C_{SH} 采集到 78 μs 的积分电压后断开，稳压复位开关闭合 10 μs 后断开，根据电荷守恒定律，单位增益缓冲器在 $t=93\ \mu s$ 时输出像素积分时间 70 μs 的差值积分电压；存储开关在 $t=95\ \mu s$ 时打开，存储模块经过 2 μs 的时间将整个线阵一帧的积分电压信号存储在电容内，将比较结果 A_1，A_2 和 A_3 转化为 2 bit 数码并存储在数字锁存器上；之后总线输出开关打开，逐个输出每个像素的光强信息和挡位信息。

总之，短曝光时积分增益最大，能够实现极短时间内快速积分，输出电压信号进行比较，长曝光时积分增益与光强信号相匹配，输出电压信号不会因为极小而在后续处理电路中与噪声混淆，也不会因为增益过大而导致像素饱和。

2.1　高速低失调比较器

在设计中，判断模块主要由多个比较器构成，比较器的失调、噪声、速度等性能会直接影响到自适应信号读出的精度和速度。多级开环比较器能够获得较高的精度，但是由于带宽限制速度较低；动态锁存器能够获得较高的速度，但是失调电压和精度较低[9]。本文采用正反馈环路的迟滞比较器（如图 4）来实现较高的速度，通过调节晶体管的电流和宽长比来实现较低的失调，使得判断电路能够快速判断光电流匹配的挡位；正反馈负载能够显著提升比较器的速度，在短曝光的极短时间内实现增益判断与信号输出。

比较器增益主要与输入管跨导 g_m 和交叉耦合系数相关，减小输入 MOS 管沟道宽长比以及增大漏电流可以提升比较器增益；比较器延时受负载 MOS 管沟道长度和漏电流影响，因此设计较小的沟道长度以及较大漏电流，如图 5 所示。从仿真结果得出，比较器的增益约为 72 dB，带宽约为 50.6 MHz，延时约为 0.05 μs。

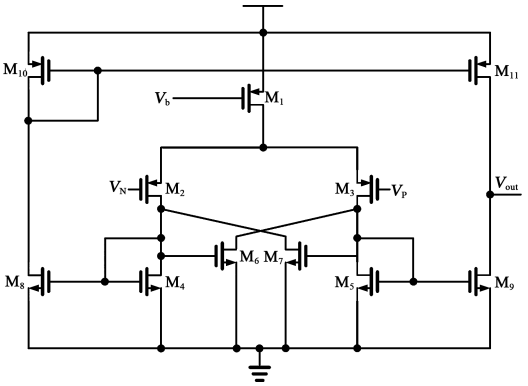


图 4　比较器电路结构

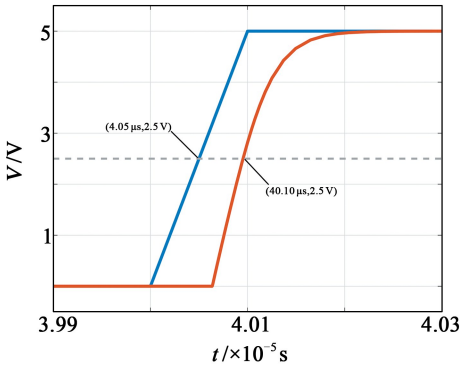


图 5　比较器仿真结果

2.2　相关双采样

相关双采样电路作为积分电路和总线输出的中间级电路，可以很好地消除像素电路中的散粒噪声、复位噪声、$1/f$ 噪声等其他固定模式噪声。考虑到传统的相关双采样电路包含减法器占用大量面积后，本文采用更为简洁的相关双采样电路[10]，如图 6 所示。

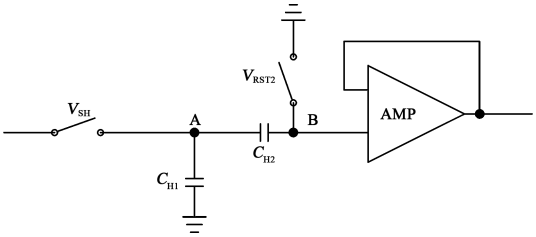


图 6　相关双采样电路

结合图 7，相关双采样电路工作原理如下：像素在 t_1 时刻开始重置，在 t_2 时刻开始积分，此时有：

$$V_A(t_2)=V_{ref} \tag{2}$$

$$V_B(t_2)=0 \tag{3}$$

开关 RST_2 在短暂曝光后断开，此时有：

$$V_A(t_3)=V_{int}(t_3-t_2) \tag{4}$$

$$V_B(t_3)=0 \tag{5}$$

$$Q_{CH2}=V_{int}(t_3-t_2)\cdot C_{H2} \tag{6}$$

$V_{int}(t)$表示读出电路在时间 t 内进行积分得到的电压；

采样开关 SH 在采样完成后断开，此时有：

$$V_A(t_4)=V_{int}(t_4-t_2) \tag{7}$$

$$V_B(t_4)=V_{int}(t_4-t_2)-V_{int}(t_3-t_2)=V_{int}(t_4-t_3) \tag{8}$$

$$Q_{CH2}=V_{int}(t_3-t_2)\cdot C_{H2} \tag{9}$$

所以最后的输出结果 $V_{out}=V_B(t_4)=V_{int}(t_4-t_3)$，为相关采样相减后的实际信号值。

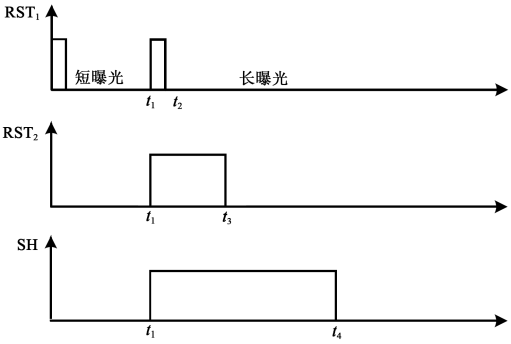


图 7 相关双采样时序

2.3 存储电路

考虑到无论是比较器输出信号和相关双采样信号在像素积分过程中都没有进行存储，需要在信号处理电路后面添加模拟子模块和数字存储单元，其中模拟存储采用电容简单存储，数字信号采用双尾结构存储，如图 8 所示。存储单元输入开关为全局开关，在整个像素线阵工作时，同时打开或关断，输出开关则为选通开关，由移位寄存器逐个输出到总线上。Converter 模块通过简单数字变换，将比较器比较结果转化为二进制代码，以方便后续数字信号处理。

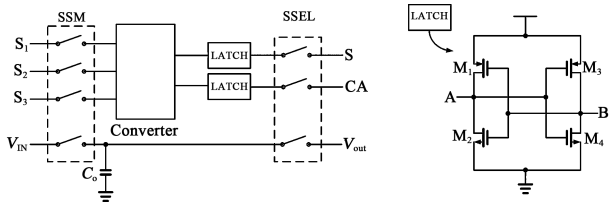


图 8 存储模块和存储子电路

3 仿真结果分析

本文中电路采用 0.5 μm 5 V-CMOS 工艺的数模混合电路，两次积分时间分别为 10 和 100 μs，重置时间为 2 μs，积分电容分别为 33 fF，165 fF，330 fF 和 3.33 pF，通过三个比较阈值实现四个增益挡位，分别对四个像素输入 100 pA，500 pA，900 pA，1.1 nA，5.1 nA，9.1 nA 和 30 nA 光电流，最终得到的 CMOS 图像传感器仿真曲线如图 9 所示。

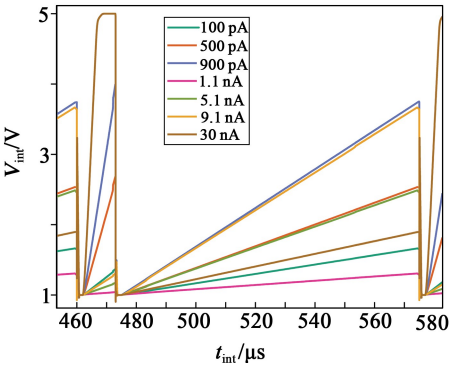


图 9 自适应积分曲线

像素首先在积分电容为 33 fF 的最大增益情况下进行短曝光，在该挡位下短曝光 10 μs，饱和光电流为 1 nA，低于该饱和电流的采样电压都可以用来进行增益调整，反之则不行。长曝光时间为短曝光时间的 10 倍，则中间增益挡位可测饱和光电流最好等于 10 nA，否则匹配的灵敏度偏低。在选定电容情况下，三个挡位阈值电压分别为 1.29，2.50，3.99 V，通过短曝光采样电压与阈值电压比较，自适应调整合适的增益挡位进行长曝光积分。以 5.1 nA 光电流为例，短曝光采样电压为 2.533 V，所以长曝光会在第三挡位下自适应积分，匹配最佳灵敏度。不同挡位信号输出的同时，电路输出挡位信息。四挡增益信息以 2 bit 数字信号方式作为模拟信号输出的补充信息，参与图像信号的后端处理，从而实现定量化应用。

最后在选定电容和增益挡位下，自适应信号读出技术可探测光电流范围为：2 pA～100 nA，光电二极管在暗光条件下电流约为 2 pA，输出信号与输入光电流对应关系如图 10 所示。

在相同积分时间内，在同一挡位下随着光照强度的提升，输出信号电压线性增大并达到最大值；在判断光电流过大时，增益挡位切换，输出信号电压在下一挡位有最小值，之后在该挡位下光照强度与输出信号电压呈线性关系，从而在测量范围内光强与输出信号电压都能较好地匹配。

与单一动态范围的探测器相比，虽然牺牲了一

点积分时间，但自适应读出的探测器对入射光强的适应范围有显著提升，使得器件无论是在弱光条件下还是在强光条件下，都能够匹配最佳的灵敏度。

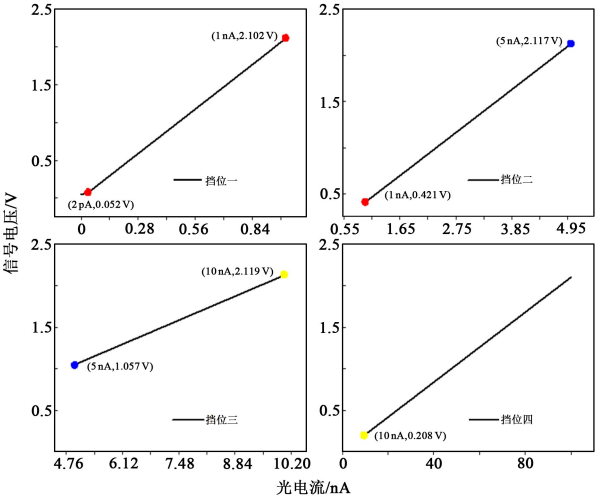


图 10　光电流与自适应读出信号的对应关系

4　结论

本文设计了一种根据光照强度自动调节增益的CMOS探测器，该探测器通过短曝光输出信号来控制读出电路增益，长曝光信号输出光强信息和增益挡位信息，从而实现在一帧内实时输出信号与增益来反映图像信息。该自适应技术极大地改善了大动态范围CMOS探测器在弱光照条件下灵敏度极低的问题，通过改变增益使得大动态范围与高灵敏度相互兼容。仿真结果表明，该探测器无论是在微弱光照条件下还是在强光照条件下都有非常好的信号读出，在四挡增益自适应切换设计下，探测器可适应的光强范围覆盖六个量级，可应用于气象、海洋、陆地资源及航空航天等各种高光谱亮暗信号相差极大的环境。

参考文献：

[1] 倪景华，黄其煜. CMOS图像传感器及其发展趋势[J]. 光机电信息，2008，25(5)：33-38.
Ni Jinghua，Huang Qiyu. CMOS image sensor and its development trend[J]. OME Information，2008，25(5)：33-38.

[2] 罗　昕. CMOS图像传感器集成电路：原理，设计和应用[M]. 电子工业出版社，2014.
Luo Xin. CMOS Image Sensor Integrated Circuit：Principles，Design，and Applications[M]. Publishing House of Electronics Industry，2014.

[3] 梁　飞. 基于CMOS图像传感器的成像技术与处理方法研究[D]. 沈阳航空工业学院，2010.
Liang Fei. Research on imaging techniques and processing methods based on CMOS image sensor [D]. Shenyang Aerospace College，2010.

[4] Jiang D Z，Liang Q H，Ding R J. A new architecture of high dynamic range readout circuits for IR FPA[J]. Inter. Society for Optics and Photonics，2014，9275：92750M.

[5] 雷　晓. 自适应光强高动态范围CMOS图像传感器的研究[D]. 电子科技大学，2016.
Lei Xiao. Research on light-adaptive high-dynamic-range CMOS image sensor [D]. University of Electronic Science and Technology of China，2016.

[6] 徐　渊，陆河辉，刘诗琪. 一种梯度自适应宽动态CMOS图像传感器像素结构[J]. 微电子学，2016，46(4)：471-475.
Xu Yuan，Lu Hehui，Liu Shiqi. A gradient self-adapting wide dynamic range CMOS image sensor pixel structure [J]. Microelectronics，2016，46(4)：471-475.

[7] 王振坤. 有机图像传感器的高性能读出电路关键技术研究[D]. 电子科技大学，2022.
Wang Zhenkun. Research on key technologies of high-performance readout integrated circuit for organic image sensor [D]. University of Electronic Science and Technology of China，2022.

[8] 徐　星，陈永平，陈世军，等. 长线列CMOS图像传感器的性能优化设计[J]. 半导体光电，2021，42(1)：52-56.
Xu Xing，Chen Yongping，Chen Shijun，et al. Performance optimization of long linear array CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(1)：52-56.

[9] 朱智勇，段吉海，邓进丽，等. 一种高速高精度动态比较器[J]. 微电子学，2017，47(2)：176-180.
Zhu Zhiyong，Duan Jihai，Deng Jinli，et al. A high speed and high precision dynamic comparator[J]. Microelectronics，2017，47(2)：176-180.

[10] Yi Zhuo，Lu Wengao，Yu Shanzhe，et al. A low-noise CTIA-based pixel with CDS for swir focal plane arrays[C]// 2021 6th Inter. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)，2021：258-262.

作者简介：

于得福(1997—)，男，湖南省永州市人，在读硕士研究生，主要从事CMOS探测器读出电路研究；

陈永平(1963—)，男，博士，研究员，主要研究方向为硅光电探测器技术。