

CMOS 有源像素传感器像素级噪声的分析与抑制

邓若汉^{1,2} 严奕^{1,2} 余金金^{1,2} 陈永平¹

(¹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)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 像素级的噪声是 CMOS 图像传感器的主要噪声源之一。针对 CMOS 有源像素传感器 3T 结构像素级的噪声问题, 分析了 3 种抑制像素级噪声的方法。分析结果表明, 复位晶体管的软复位噪声要小于硬复位噪声的 $\sqrt{2}$ 倍, PMOS 管的 $1/f$ 噪声低于 NMOS 管的 $1/f$ 噪声, 同时 $1/f$ 噪声会随着栅面积的减小而增大。通过对像素的噪声分析, 完成了 3 种像素级的集成电路的设计仿真, 并采用了 $0.5\ \mu\text{m}$ 标准 CMOS 工艺进行流片制作。测试表明, 噪声的相对变化与分析结果吻合。

关键词 传感器; 低噪声像素设计; CMOS 有源像素传感器; 3T 结构

中图分类号 TN492

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.050401

Analysis and Reduction of Pixel Noise in CMOS Active Pixel Sensor

Deng Ruohan^{1,2} Yan Yi^{1,2} Yu Jinjin^{1,2} Chen Yongping¹

(¹Key Laboratory of Infrared Image Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The pixel noise is one of the fundamental noises in CMOS pactive pixel sensors. We focus on the pixel noise of CMOS active pixel sensors with three different 3T pixel structures for reducing noise. The analysis results show that soft reset leads to lower noise by a factor of $\sqrt{2}$ than normal KTC noise level. Besides, the $1/f$ noise of PMOS is much lower than that of NMOS, and the $1/f$ noise will become larger with the decrease of grate area. Based on above analysis, the design and simulation of three different CMOS APS are accomplished. Samples are fabricated by standard $0.5\ \mu\text{m}$ CMOS process. Test results show that the changes of noise with different pixels match well with analysis results.

Key words sensors; low noise pixel design; CMOS active pixel sensors; three transistor structure

OCIS codes 040.0040; 100.2960

1 引言

在可见光波段, 图像传感器主要有 CMOS 图像传感器(CIS)和 CCD 两种。CIS 采用成熟的 CMOS 工艺, 可以在单个芯片上集成光电探测器和读出、放大、A/D 转换等电路, 具有低成本、低功耗、高帧频、高速随机读取等优点^[1]。CIS 由于其自身的优势已经在许多领域取代了传统的 CCD。但相比 CCD, CIS 的噪声偏大, 其中尤其是读出噪声^[2]。而作为 CIS 读出电路的第一级电路——像素级读出电路对整个读出电路的噪声贡献最大^[3]。因此在 CIS 探测应用, 尤其在微弱信号的探测应用中, 对像素级电路噪声进行研究分析具有实用意义。

在对像素级电路噪声的研究分析工作方面, Xinyang Wang 等^[4]介绍了一种采用钉扎光电二极管 4T 像素结构 CMOS 有源像素传感器(APS), 这种传感器用埋沟的跟随器作为它的像素级放大器, 极大地降低了

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-11-17

作者简介: 邓若汉(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事低噪声 CMOS 探测器方面的研究。

E-mail: dengruohan@126.com

导师简介: 陈永平(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事 CMOS 探测器方面的研究。E-mail: chen_yp@mail.sitp.ac.cn

像素内的 $1/f$ 噪声。Degerli 等^[5] 提出用 PMOS 晶体管代替 NMOS 晶体管能大幅的降低 $1/f$ 噪声。Pain 等^[6] 提出利用软复位可使等效输入噪声电压小于 $\sqrt{\frac{KT}{2C}}$ 。

本文在研究 CMOS APS 工作机理和制作工艺的基础上, 结合对像素级电路中的 KTC 噪声、 $1/f$ 噪声、热噪声以及固定图形噪声的成因及抑制技术的分析和讨论。分别设计了 3 种结构的 APS 像素级电路, 其中包括常见的全 NMOS 管的 3T 结构 APS 和使用 PMOS 复位的 3T 结构 APS 以及 PMOS 跟随的 3T APS。

2 CMOS APS 像素级电路及其工作原理

CMOS APS 一般由光电二极管、复位晶体管以及读出电路组成, 其结构如图 1 所示。在 APS 结构中像素电路由复位管 M_1 、光电二极管(PD)、输出缓冲放大器 M_2 、行选择管 M_3 和列共用有源负载管 M_4 组成。其中复位信号通过 M_1 控制积分时间, 由 PD 将光信号转换为电信号, M_2 作为电压跟随器增强 PD 输出驱动能力, 行选信号通过 M_3 控制读出, M_4 则负责调节像素工作时源跟随器的电流。

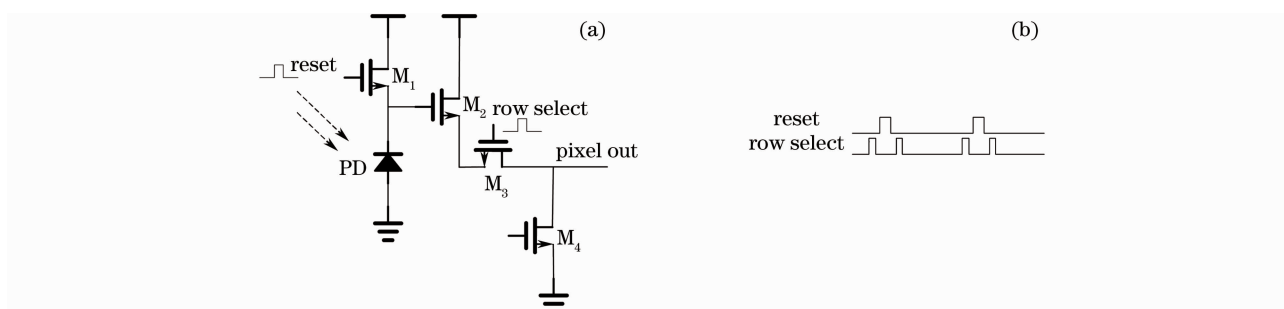


图 1 CMOS 3T APS 像素电路结构及电路时序。(a)像素电路结构,(b)像素电路时序

Fig. 1 Pixel structure and timing diagram of CMOS 3T APS. (a) pixel structure, (b) timing diagram

3 CMOS APS 像素级噪声组成及其产生机理

在 CMOS APS 中, 噪声可能来自外界, 也可能来自探测器和读出电路本身。作为 CMOS APS 的第一级电路, 像素级电路的噪声在很大的程度上决定了整个 APS 的噪声水平。像素级的噪声主要包括 KTC 噪声、 $1/f$ 噪声、热噪声、散粒噪声以及由电路结构和电路工作方式引入的附加噪声。

KTC 噪声是由电路结构和电路工作方式引入的。在读出电路中, 积分电容和采样/保持电容在通过 MOS 管周期性地复位或导通时, 就会由 MOS 管导通时的沟道电阻引入 KTC 噪声, 属于热噪声, KTC 噪声电压平方的平均值为 $\overline{V_n^2} = \frac{KT}{C}$ 。在 CMOS APS 像素中, 由于需要对光电二极管进行周期性复位, 不可避免地给像素引入了 KTC 噪声, 是 APS 像素的最主要噪声来源。 $1/f$ 噪声存在于所有的有源器件中, 目前 $1/f$ 噪声的起因尚不是很明确, 对于 MOS 晶体管, 一般认为 $1/f$ 噪声是由 MOS 管的 Si-SiO₂ 表面的晶格缺陷造成的。 $1/f$ 噪声是一种低频噪声, 主要表现在 1 kHz 以下。 $1/f$ 噪声的噪声电流谱为 $i_n^2 = \eta \frac{I_{AF}}{f^b} \Delta f$ 。在 CMOS APS 像素中, $1/f$ 噪声主要来自输出缓冲放大器晶体管, $1/f$ 噪声是 APS 像素的重要噪声来源。热噪声是一种白噪声, 存在于所有电子器件和传输介质中, 它是温度变化的结果, 不受频率变化的影响。热噪声电压功率谱密度可以表示为 $\overline{V_n^2} = 4kTR\Delta f$ 。热噪声是像素最基本的误差源。由于它在每一次的采样中都不同, 所以很难对它进行校正。散粒噪声也是一种白噪声, 起源于电子本身的离散特性, 如暗电流散粒噪声源于耗尽区热生电子-空穴对随机产生, 光电流散粒噪声源于光生电子-空穴对随机产生。若噪声服从泊松分布, 方差等于均值, 则在暗电流密度为 J_{dark} , 在面积为 A , 积分时间为 t_{int} 的传感器中, 暗电流散粒噪声方差为 $\langle n_{dark}^2 \rangle = \frac{J_{dark} A t_{int}}{q}$ 。光生散粒噪声方差为 $\langle n_{pe}^2 \rangle = \eta I_0 A t_{int}$, 其中 I_0 是光子通量, η 是量子效率。于是总的散粒噪声为

$$n_{\text{shot}} = \sqrt{\langle n_{\text{dark}}^2 \rangle + \langle n_{\text{pe}}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{J_{\text{dark}} A t_{\text{int}}}{q} + \eta I_0 A t_{\text{int}}} \quad (1)$$

光电流散粒噪声与照度有关,比较难消除。与暗电流有关的散粒噪声可以通过改变掺杂浓度减小暗电流,但这会降低量子效率。暗电流的大小也与像素面积有关,较小的像素,暗电流散粒噪声较小。在 CMOS 图像传感器中通常可以忽略散粒噪声的影响。

此外,像素内的复位 MOS 开关以及行选开关也会给像素带来开关噪声。由于栅源电容和其他分布电容的耦合作用,在这些开关 MOS 管导通和断开的瞬间,会在与之相连的积分电容、输出线分布电容或其他分布电容上形成微分状的尖脉冲。这些尖脉冲增加了电路的瞬变过程时间,使电路的频率响应变差,也降低了输出信号的信噪比,可以通过器件版图的优化设计和提高驱动信号的质量等措施来减小这类开关噪声。在 CMOS APS 像素中,开关噪声也是像素的一个噪声来源。

根据上述分析,得出像素内噪声源的影响因子及其占像素总噪声的比例如表 1 所示。

表 1 像素可能的噪声源、敏感因子以及对总像素噪声的贡献比例

Table 1 Parameters of noise sources and their proportions of total noise

Noise source	Equation	Proportion of total noise
KTC noise	$\overline{V_n^2} = \frac{KT}{C}$	Major source
1/f noise	$i_n^2 = \eta \frac{I_{\text{AF}}}{f^b} \Delta f$	Important source
Thermal noise	$\overline{V_n^2} = 4kTR\Delta f$	Basic source
Shot noise	$n_{\text{shot}} = \sqrt{\frac{J_{\text{dark}} A t_{\text{int}}}{q} + \eta I_0 A t_{\text{int}}}$	Minor source
Switch noise	/	Minor source
Else noise	/	Minor source

4 CMOS APS 像素级噪声的定量分析及仿真设计

为了更好地计算 APS 的等效输入均方根噪声,重点考虑像素内最重要的两个噪声源:1/f 噪声以及 KTC 噪声。

4.1 1/f 噪声分析

在 CMOS APS 像素中,1/f 噪声主要来自输出缓冲放大器晶体管。MOS 管的 1/f 噪声等效到栅极输入的噪声谱为

$$\overline{V_{\text{in}}^2} = \frac{K}{C_{\text{ox}}WL} \times \frac{1}{f}, \quad (2)$$

式中 K 是一个与工艺相关的常量。由(2)式容易得出,增加器件的面积可以减小 1/f 噪声。另外,用 PMOS 管替代 NMOS 管也可以减小 1/f 噪声。

在本设计中利用了这两个抑制 1/f 噪声的办法,设计了两组对比实验,如表 2,3 所示。其中一组设计了 3 种不同栅面积输出缓冲放大晶体管的像素结构,如表 2 所示。另一组设计了分别采用 PMOS 管和 NMOS 管作为跟随的像素结构,如表 3 所示。

表 2 NMOS 跟随管设计参数

Table 2 Size parameters of NMOS amplifiers transistors

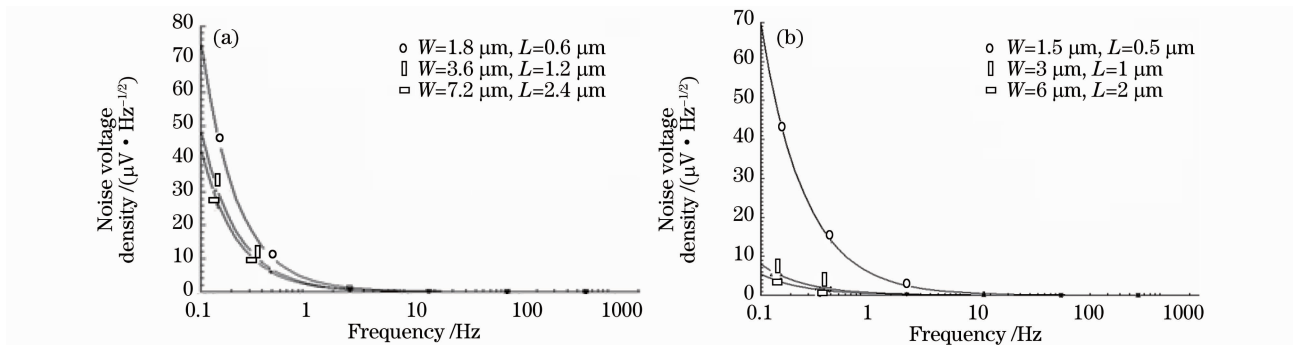
Pixel variable design	Source follower transistor NMOS	Detector diode	Reset transistor NMOS	Row select transistor NMOS	Active load NMOS
Transistor size	$W/L=1.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ $W/L=3 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$ $W/L=6 \mu\text{m}/2 \mu\text{m}$	N well/P sub	$W/L=3 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$	$W/L=3 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$	$W/L=4 \mu\text{m}/4 \mu\text{m}$

表 3 像素跟随晶体管设计参数

Table 3 Size parameters of pixel amplifier transistors

Pixel variable design	Source follower transistor	Detector diode	Reset transistor NMOS	Row select transistor	Active load
Transistor size	PMOS $W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	N well/P sub	$W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	PMOS $W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	/
Transistor size	NMOS $W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	N well/P sub	$W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	NMOS $W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	NMOS $W/L=4\ \mu\text{m}/4\ \mu\text{m}$

采用 Cadence 软件公司的 Spectre 对上述设计进行噪声频谱仿真,取 $0.5\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺库中参数 K 的典型值,得到仿真结果如图 2 所示。可以看到,输出跟随管的面积越大 $1/f$ 噪声越小。另外,同样宽长下 PMOS 管的 $1/f$ 噪声会比 NMOS 管小很多。

图 2 不同像素设计的 $1/f$ 噪声。(a) PMOS,(b) NMOSFig. 2 $1/f$ noises of different pixel amplifier. (a) PMOS, (b) NMOS

4.2 KTC 噪声分析

通常在 3T APS 器件中,复位操作有硬复位和软复位两种^[7]。硬复位是指复位管一直工作在线性区,PD 和复位管漏极处在热平衡状态。复位噪声电压的平方为 $\overline{V_n^2} = \frac{KT}{C}$ 。软复位是指在复位的结束阶段,复位管工作在亚阈值状态的情况。在软复位下,PD 和复位管漏极没有达到热平衡状态。复位噪声电压的平方为 $\overline{V_{n-s}^2} = \frac{KT}{2C}$ 。

根据以上对复位的分析,设计了一组对比实验。在该对比实验中,分别采用了 PMOS 管和 NMOS 管作为像素的复位管。具体参数设计见表 4。

表 4 像素复位晶体管参数设计

Table 4 Size parameters of reset transistors

Pixel variable design	Reset transistor	Detector diode	Source follower NMOS	Row select transistor NMOS	Active load NMOS
Transistor size	PMOS $W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	N well/P sub	$W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	$W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	$W/L=4\ \mu\text{m}/4\ \mu\text{m}$
Transistor size	NMOS $W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	N well/P sub	$W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	$W/L=3\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$	$W/L=4\ \mu\text{m}/4\ \mu\text{m}$

5 测试结果

上述设计全部用 $0.5\ \mu\text{m}$ 标准 CMOS 工艺进行了流片制作,在对芯片进行测试后,得到了 $1/f$ 噪声谱以及总噪声值,如图 3 及表 5 所示,这些结果都是没有经过相关双采样得到的。从测试结果中可以看出,实验中噪声的测量值比估算值高了很多。其原因主要有两个:一是在噪声分析中参数 K 的取值与实际工艺有较大差别,二是噪声测试系统引入了较大的噪声。但是采用 PMOS 管和 NMOS 管的噪声大小仍呈现出一定的差别,且噪声随频率的变化与分析结果一致。由于 PMOS 管和 NMOS 管的大小相同,因此测试结果还是

得到了与分析结果一致的结论:即使用 PMOS 管作为输出跟随的 $1/f$ 噪声比使用 NMOS 管的噪声低,使用 NMOS 管软复位的像素噪声比 PMOS 硬复位的噪声低。

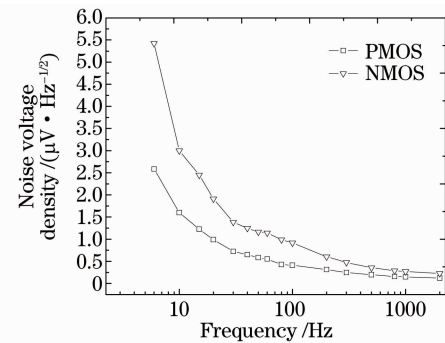
表 5 像素总噪声分析与测量值

Table 5 Measured and analysis results of total output noises of pixel

Pixel type	Theory noise / μV	Measured noise / μV
NMOS reset; NMOS source follower	235	420
NMOS reset; PMOS source follower	205	385
PMOS reset; NMOS source follower	295	470

6 结 论

对 3 种集成电路的测试结果进行比较表明:用 PMOS 管代替 NMOS 管能在一定程度上抑制 $1/f$ 噪声,大的尺寸的晶体管能较明显地降低 $1/f$ 噪声;使用 NMOS 管软复位比 PMOS 硬复位的噪声低。在低噪声像素电路的基础上,在像素的后级电路上加上相关双采样可以消除绝大部分系统引入的噪声,同时也可消除大部分的 KTC 噪声和 $1/f$ 噪声^[8~11]。像素级噪声分析结果对于设计低噪声有源像素传感器具有指导意义。

图 3 NMOS 和 PMOS 跟随管设计的 $1/f$ 噪声谱Fig. 3 $1/f$ noises of NMOS and PMOS pixel amplifiers

参 考 文 献

- O. Yadid-Pecht, B. Mansoorian, E. Fossum *et al.*. Optimization of noise and responsivity in CMOS active pixel sensor for detection of ultra low light levels[C]. *SPIE*, 1997, **3019**: 125
- Li Jijun, Du Yungang, Zhang Lihua *et al.*. Research progress on CMOS image sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(4): 45~52
李继军, 杜云刚, 张丽华 等. CMOS 图像传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(4): 45~52
- S. K. Mendis, S. E. Kemeny, R. C. Gee *et al.*. Progress in CMOS active pixel image sensors[C]. *SPIE*, 1994, **2172**: 19
- Xinyang Wang, Martijn F. Snoeij, Padmakumar R. Rao *et al.*. A CMOS image sensor with a buried-channel source follower[C]. *IEEE. ISSCC, Image Sensors & Technology*, 2008, 62~595
- Y. Degerli, F. Lavernhe, P. Magnan *et al.*. Band limited $1/f$ noise source[J]. *Electronics Letters*, 1999, **35**(7): 521~522
- H. Tian, B. Fowler, A. Gamal. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor[J]. *IEEE. J. Solid-State Circuits*, 2001, **36**(1): 92~101
- Igor Brouk, Amikam Nemirovsky, Kamal Alameh *et al.*. Analysis of noise in CMOS image sensor based on a unified time-dependent approach[J]. *Solid-State Electronics*, 2010, **54**: 28~36
- Zhang Zhi, Yuan Xianghui, Huang Youshu *et al.*. A new correlated-double-sampling circuit for large format CMOS FPA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(4): 260~263
张 智, 袁祥辉, 黄友恕 等. 一种用于大面积 CMOS FPA 的相关双采样保持电路[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(4): 260~263
- Jin X. L., Chen J.. Novel principle and realization of simple low-power low-noise correlated double sampling for CMOS pixel readout circuit[C]. *IEEE. C. Electron Device and Solid-State Circuits*, 2003. 113
- E. Mgonquin Road, Schaumburg. Noise analysis of correlated double sampling SC-integrators[C]. *IEEE. I. S. Circuit and systems*, 2002
- Shang Yuanyuan, Zhang Weigong, Song Yu *et al.*. Research on evaluation method of CMOS imager[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051101
尚媛园, 张伟功, 宋 宇 等. CMOS 成像器件性能测试方法的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(5): 051101