

CMOS 图像传感器 4T 像素本底噪声分析

李 栋, 刘文平, 张 冰, 李 炘, 何 杰

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为了抑制本底噪声, 提高图像动态范围, 首先给出 CMOS 图像传感器的 4T 像素结构, 分析该结构下的基本噪声源. 然后, 分别讨论了各本底噪声分量的形成及对信号的影响, 并以噪声电子数的形式对各噪声分量进行了定量分析, 提出了相应的噪声抑制措施, 且进行了仿真验证.

关键词: CMOS 图像传感器; 4T 像素; 本底噪声; 动态范围

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)03-0138-04

Analysis of Noise Floor for 4T Pixel in CMOS Image Sensor

LI Dong, LIU Wen-ping, ZHANG Bing, LI Xin, HE Jie

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To suppress the noise floor and enhance the dynamic range, firstly, the structure of 4T pixel is shown, which of the basic noise is analyzed. Then the influence to signal and emergence of the kinds of noise floor are discussed, and the kinds of noise is quantitatively analyzed in the form of noise electrons. Finally the measures to suppress noise are put forward, which are verified by the simulation.

Key words: CMOS image sensor; 4T pixel; noise floor; dynamic range

1 引言

CMOS 图像传感器 (CMOS Image Sensors, CISs) 由于其低功耗, 高集成度, 低成本等诸多优势被日益青睐, 逐步取代了电荷耦合器件 (Charge-Coupled Devices, CCDs)^[1]. 但 CISs 运用更多的有源器件而不可避免地引入了更多噪声, 成为限制其图像动态范围的主要问题. 在 CISs 像素的各种结构中, 3T 像素有很高的填充因子 (Fill Factor, FF), 但其对 KT/C 噪声的抑制能力较差; 而 5T 及更复杂的像素结构由于其较低的 FF, 很难在超大规模 CISs 中应用.

本文基于 4T-APS 像素结构, 研究该结构噪声源及其各自特性, 重点分析影响动态范围的本底噪声的形成及表现, 并分别将各本底噪声分量转化为等效输入噪声电子数进行定量分析, 针对不同的噪声提出相应的抑制措施.

2 4T-APS 像素结构

4T-APS 像素结构是目前 CISs 的主流结构之一, 该结构有利于相关双采样 (Correlated Double Sampling, CDS) 技术的运用, 有效抑制噪声, 并且有较高的 FF, 利于扩展动态范围, 常应用于大阵列的 CISs 设计中. 4T-APS 像素结构如图 1 所示, 该结构由钳位光电二极管 (Pinned-Photodiode, PPD)、传输管 M_{TG} 、复位管 M_{RST} 、源极跟随器 M_{SF} 和行选管 M_{RS} 组成.

3 4T-APS 本底噪声分析及仿真

在 4T-APS 像素中, 本底噪声是制约动态范围的一个主要因素. 通常, 将暗光条件下限制图像质量的噪声称为本底噪声, 主要包括暗电流的散粒噪声、源极跟随器 M_{SF} 的 $1/f$ 噪声和热噪声. 如下式所示:

$$n_{\text{noise_floor}} = n_{\text{shot_dark}} + n_{1/f_SF} + n_{\text{thermal_SF}} \quad (1)$$

式中, $n_{\text{noise_floor}}$ 表示总的本底噪声电子数; $n_{\text{shot_dark}}$ 表

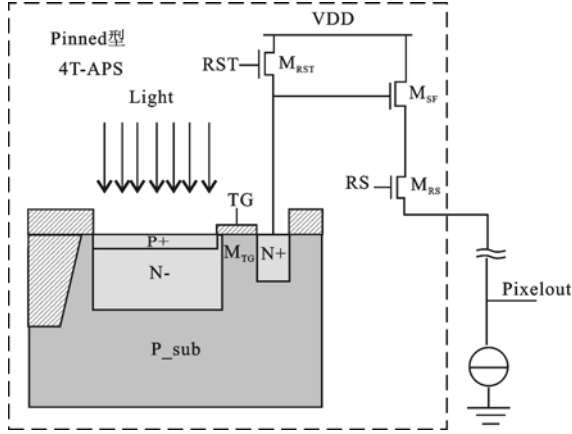


图1 Pinned型4T-APS像素结构示意图

示暗电流的散粒噪声电子数; n_{1/f_SF} 和 $n_{thermal_SF}$ 分别表示源极跟随器 M_{SF} 的 $1/f$ 噪声和热噪声. 下面分别予以讨论.

3.1 暗电流及其散粒噪声

暗电流是指在没有光照时光电二极管所产生的电流. 对硅光电二极管, 暗电流的大小与温度和掺杂浓度强烈相关. 通常, 温度每升高 $5 \sim 10^\circ\text{C}$ 时暗电流翻一番^[2]. 传统光电二极管的暗电流在 nA/cm^2 量级.

由暗电流的产生机理知^[2], 其主要分为四个方面: ① Si-SiO₂ 界面或硅表面等引入的漏电流 I_s ; ② 耗尽层产生-复合电流 I_{g-r} ; ③ 电中性区的扩散电流 I_d ; ④ 强电场条件下的隧道效应产生的穿通电流 I_t . 即:

$$I_{\text{dark}} = I_s + I_{g-r} + I_d + I_t \quad (2)$$

式中:

$$I_s \propto A_s, A_s \text{ 为 Si-SiO}_2 \text{ 界面面积};$$

$$I_d \propto \exp\left(-\frac{E_g}{k_0 T}\right), E_g \text{ 为禁带宽度}; k_0 \text{ 为玻尔兹曼常数}; T \text{ 为温度};$$

$$I_{g-r} \propto \sqrt{V_{\text{pinned}}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_0 T}\right), V_{\text{pinned}} \text{ 为 PPD 的夹断电压};$$

$$I_t \propto V_{\text{pinned}}^2 \exp\left(-\frac{E_g}{k_0 T}\right).$$

通常, 习惯用电子数来表征暗电流, 故在一定的时间段内, 有

$$n_{\text{dark}} = \frac{I_{\text{dark}} T_{\text{int}}}{q} \quad (3)$$

式中, n_{dark} 表示暗电子数; T_{int} 表示积分时间, q 表示单位电荷量, 为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C/e}^-$.

研究表明, 暗散粒噪声的电子数为暗电子数的平方根^[3], 即:

$$n_{\text{shot_dark}} = \sqrt{n_{\text{dark}}} \quad (4)$$

式中, $n_{\text{shot_dark}}$ 表示由暗电流产生的散粒噪声的均方根电子数.

由式(3)和式(4)可知, 为了减小暗散粒噪声来抑制本底噪声, 需要减小暗电流. 研究表明, CISs 暗电流主要来自于 PPD 周边的各种复合中心, 而该复合中心主要存在于包围 PPD 的浅槽隔离 (Shallow Trench Isolation, STI) 以及 PPD 的表面, 这些区域内由于之前工艺中的刻蚀、离子注入等原因, 形成晶格缺陷和界面态^[3]. 因此, 减小暗电流在工艺方面的主要工作就是尽可能减少这些复合中心的出现, 或者将其与光电荷收集区隔离开来, 以阻止复合中心产生的暗电流被收集. PPD 的 P+ 层将产生光电荷的 N- 层与表面隔离, 大大减小了暗电流. 下面提出另外两种抑制暗电流的措施: (1) 隔离 STI 与 PPD 的耗尽区 (如图 2(a) 所示), 可将 STI 做在 P 阱中, P 阱的掺杂浓度可与 P+ 相比拟, 高的 P 型掺杂使 Si-SiO₂ 界面空间电荷区变薄, 减少了复合中心的产生, 从而减小了 I_s 对暗电流的贡献; (2) 由式(1)可知, 降低 PPD 型光电二极管的夹断电压, 能减小穿透电流 I_t 和耗尽区的产生-复合电流 I_{g-r} , 图 2(b) 给出了夹断电压与暗电子数的关系曲线.

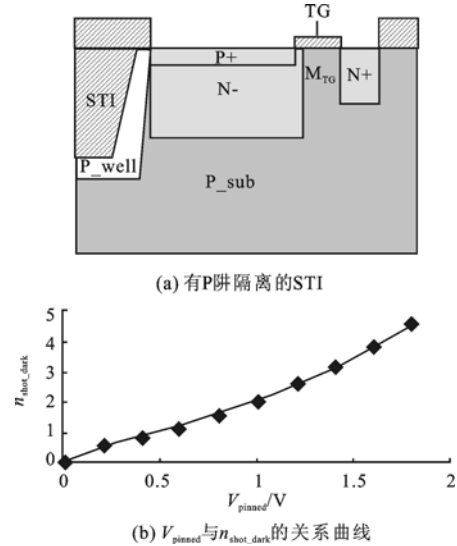


图2 暗电流的抑制

3.2 KT/C 噪声及热噪声

在 4T-APS 像素中, M_{RST} 导通后基本处于线性区, 等效为电阻 R ^[3]. 由于 FD 点存在寄生电容 C_{FD} , 使得像素在复位状态下可等效为一个 RC 模型, 进而简化分析过程, 如图 3 所示. 从图 3 中可知, 电阻 R 产生的热噪声功率谱密度将被 RC 低通滤波器整形, 因此得到 M_{RST} 管的热噪声功率为^[4]

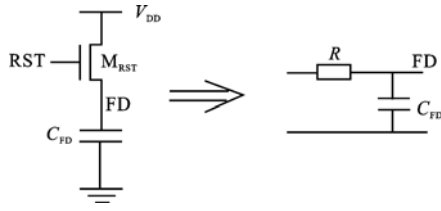


图3 KT/C 等效模型

$$V_{KT/C}^2 = \frac{T}{C_{FD}} \quad (5)$$

式中, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常数, T 表示温度. 因此, 复位管 M_{RST} 的热噪声也常被称为 KT/C 噪声, 其功率谱密度如图 4 所示. C_{FD} 表征了 FD 点电荷—电压转换增益的大小,

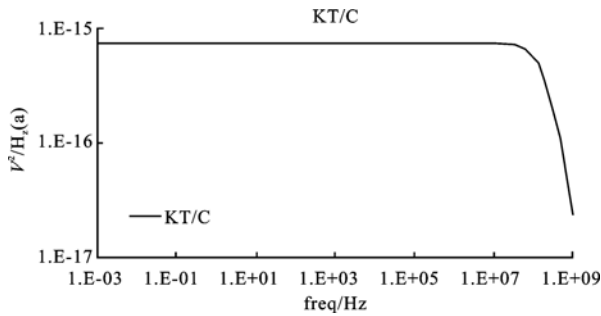


图4 KT/C 噪声功率谱密度

转换关系如下:

$$CG = \frac{q}{C_{FD}} \quad (6)$$

式中, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C/e}^-$.

所以, KT/C 的噪声电子数为

$$n_{KT/C} = \frac{\sqrt{V_{KT/C}^2}}{CG} = \frac{\sqrt{kTC_{FD}}}{q} \quad (7)$$

由式(7)可知, 在参数 C_{FD} 确定后, 其 KT/C 噪声电子数也为固定值, 量化上述公式可知该电子数会很大. 但是, 在 4T 结构像素中, 采样所得的复位信号和光信号中 KT/C 噪声的相关性为 1, 即两次 CDS 采样(如图 5 所示)包含同样大小的 KT/C 噪声分量, 故而 CDS 技术能完全消除该噪声分量^[5]. 然而, 对于源极跟随器 M_{SF} 的热噪声, 由于两次采样的相关性小于 1, 故不能被完全消除. 其产生的噪声电子数为

$$n_{\text{thermal_SF}} = \frac{\sqrt{\int_0^\infty V_{\text{thermal_SF}}^2 df}}{CG} \quad (8)$$

式(7)中, $\sqrt{V_{\text{thermal_SF}}^2} = \frac{8kT}{3g_m}$ 为源极跟随器 M_{SF} 的热噪声功率谱密度^[4].

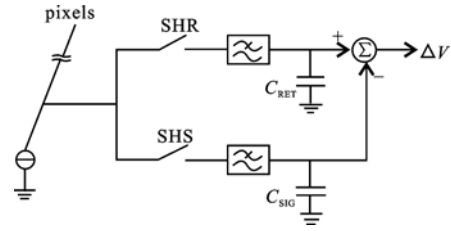


图5 CDS 示意图

3.3 1/f 噪声

MOS 管的栅氧化层与硅衬底接触面存在界面态及缺陷, 使电子通过沟道时被随机俘获—释放, 这种现象产生的噪声即为闪烁噪声. 由于其功率谱密度与频率成反比, 故常称为 $1/f$ 噪声. 其功率谱密度为^[4]:

$$\overline{V_{1/f}^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \cdot \frac{1}{f} \quad (9)$$

式中, K 为工艺相关参数, 数量级为 $10^{-25} \text{ V}^2 \text{ F}$. 显然, 该噪声的功率谱密度与 MOS 管的栅面积成反比, 且随着频率降低其影响越大, 故 $1/f$ 噪声属低频噪声.

在像素结构中, 由于复位管的 KT/C 噪声能被 CDS 技术有效消除, 因而相对分量较小的源极跟随器 $1/f$ 噪声成为 CDS 技术后 4T-APS 的主要本底噪声分量. 但如果 CDS 的两次采样间隔很短, 则两次采样所得的 $1/f$ 噪声也有一定的相关性, 所以 CDS 技术一定程度上也能减小 $1/f$ 噪声^[6]. 图 6 给出了 CDS 前后 $1/f$ 噪声的功率谱密度的仿真结果, 由图 6 可知, CDS 明显抑制了低频域下的 $1/f$ 噪声分量.

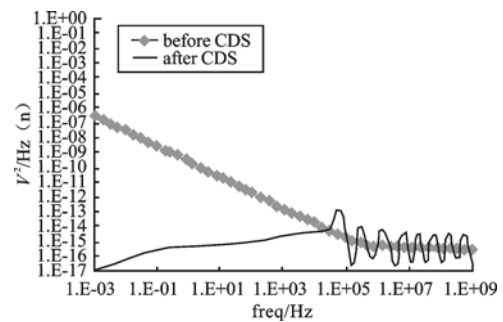


图6 CDS 前后 1/f 噪声的功率谱密度

为了定量分析, 利用 CDS 在频域传输函数^[7]式(10)可以得到 CDS 后源极跟随器 M_{SF} 的噪声功率谱密度式(11), 如下:

$$|H_{CDS}(f)| = |2\sin\pi f \cdot t| \quad (10)$$

$$\overline{V_{1/f_afterCDS}^2} = \overline{V_{1/f}^2} \times H_{CDS}(f) = \frac{K}{C_{ox}WLf} \cdot 2\sin\pi f \cdot t \quad (11)$$

式中, $t = 1/f$ 为两次采样的时间间隔.

通过 AC 仿真可以得到源极跟随器 M_{SF} 的 -3 dB 带宽 $B_{-3\text{dB_SF}}$, 于是得到噪声的带宽为

$$B_{1/f_SF} = \frac{\pi}{2} B_{-3\text{dB_SF}} \quad (12)$$

从而, 可以得到 CDS 后 $1/f$ 噪声的均方根噪声电压:

$$V_{1/f_afterCDS} = \sqrt{\int_1^{B_{1/f_SF}} V_{1/f_afterCDS}^2 df} \quad (13)$$

进而, $1/f$ 噪声在 FD 点的等效输入噪声电子数为

$$n_{1/f_afterCDS} = \frac{\sqrt{\int_1^{B_{1/f_SF}} V_{1/f_afterCDS}^2 df}}{CG \times \beta} \quad (14)$$

式中, β 为源极跟随器 M_{SF} 的低频增益. 可见, 由于 CDS 技术使得 $1/f$ 噪声在低频域的功率谱密度明显降低, 故而能大大减小源极跟随器 M_{SF} 的 $1/f$ 噪声电子数.

3.4 本底噪声的抑制对动态范围的扩展

以上对 4T-APS 像素各本底噪声分量的分析中, 提出了用 P 阱隔离 PPD 中 STI 以及在适当的范围内降低夹断电压的方式来减小暗电流, 进而降低暗电流的散粒噪声. 提出了通过 CDS 技术来消除 KT/C 噪声, 降低源极跟随器的 $1/f$ 噪声. 因此, 由式(1)、式(4)、式(8)和式(14)可得, 抑制后的本底噪声为

$$n_{\text{noise_floor}} = \sqrt{n_{\text{dark}}} + \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} V_{\text{thermal_SF}}^2 df}}{CG} + \frac{\sqrt{\int_1^{B_{1/f_SF}} V_{1/f_afterCDS}^2 df}}{CG \times \beta} \quad (15)$$

由于, 在 4T-APS 像素中, 其动态范围为:

$$DR = 20 \log \left(\frac{N_{\text{sat}}}{n_{\text{noise_floor}}} \right) (\text{dB}) \quad (16)$$

式中, N_{sat} 表示满阱时的光电荷量. 所以, 本底噪声的抑制能有效扩展动态范围. 图 7 所示为本底噪声

抑制前后对动态范围的扩展.

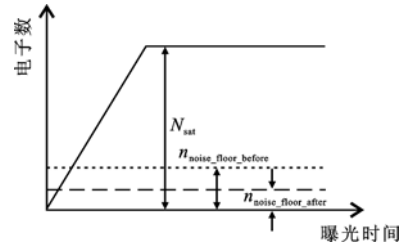


图7 本底噪声抑制前后的动态范围

4 结束语

CMOS 图像传感器已日渐成为主流的图像传感器, 由于人们对其成像质量要求的进一步提高, 抑制噪声成为一个必然的要求. 本文从 4T-APS 像素结构出发, 对该结构下不同的本底噪声均转化为等效输入噪声电子数来定量分析, 并分别提出了抑制措施, 提高了图像动态范围, 对 CISs 的研究有指导意义.

参考文献:

- [1] Adam Godbeer. Investigation of 4T CMOS Image Sensor Design and the Effects of Radiation Damage[D]. Surrey: University of Surrey, 2010.
- [2] 王粒子. CMOS 光电探测器暗电流削减技术研究和相关电路设计[D]. 上海: 复旦大学, 2007.
- [3] 张生才, 董博彦, 徐江涛. 光电二极管有源像素 CMOS 图像传感器固定模式噪声分析[J]. 传感器学报, 2005, 18(4): 798-801.
- [4] 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: 25-353.
- [5] Hui Tian, Boyd Fowler, et al. Analysis of Temporal Noise in CMOS Photodiode Active Pixel Sensor[J]. Solid-State Circuits, 2001, 36(1): 92-101.
- [6] Hyneczek J. CDS Noise Reduction of Partially Reset Charge-Detection Nodes[J]. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Application, IEEE Transaction on, 2009, 49(3): 276-280.

作者简介:

李 栋 男, (1988—), 硕士. 研究方向为 CMOS 图像传感器像素设计.