

一种提升 4T-APS 像元量子效率的方法

李 忻, 唐 威, 张 冰, 李 栋, 何 杰

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要: 通过调整钳位光电二极管 P+ 层掺杂浓度与阈值注入浓度, 抑制了 4T-APS 像元传输管亚阈值漏电, 提升了像元的满阱能力与量子效率, 并应用 TCAD 工具进行了仿真验证. 结果表明, 像元满阱容量可由 3500e⁻ 提升至 7900e⁻, 550 nm 入射光条件下量子效率可提升 27.8%.

关键词: 互补金属氧化物场效应管; 图像传感器; 有源像素传感器; 钳位光电二极管; 满阱能力; 量子效率

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)03-0119-03

A Method to Improve the Quantum Efficiency of the 4T-APS Pixel

LI Xin, TANG Wei, ZHANG Bing, LI Dong, HE Jie

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

Abstract: By adjusting concentration of the P+ layer in Pinned photodiode and Vt implant, sub-threshold leakage of the transfer gate in CMOS image sensor is reduced, and full well capacity and quantum efficiency of the pixel are improved. Simulation is performed with TCAD tools. The results show that the method is effective. Full well capacity could be raised from 3500e⁻ to 7900e⁻ and quantum efficiency for 550 nm incident light could be increased by 27.8%.

Key words: CMOS; Image Sensor; APS; PPD; Full well capacity; Quantum efficiency

1 引言

近年来, 钳位光电二极管(Pinned photodiode, PPD)由于暗电流低、光谱接收范围广等优点, 成为当前互补金属氧化物场效应管(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)图像传感器常用的感光结构. 量子效率(Quantum Efficiency, QE)作为像元设计的重要指标, 其值将直接影响像元感光区面积、像元工作电压范围、满阱电荷能力以及曝光时间和动态范围等参数. 因此, 研究 PPD 型像元的量子效率有利于 4T-APS 像元性能的优化. 目前, 国内外对于 CMOS 图像传感器量子效率的研究主要集中在器件结构的改进与新工艺的开发上, 文献[1-2]中提出 N+ 层的拓宽、封装玻璃板的增透以及感光区光导通路的优化等方法, 都需要引入额外的相关技术才能实现.

针对以上问题, 本文通过分析 4T-APS 像元结

构及可见光光谱的特点, 评估传输管(Transfer Gate, TG)漏电, 提出可以提高像元 QE 指标的工艺优化方案. 该方案仅在常规 CMOS 工艺基础上调整工艺参数即可实现.

2 基于 4T-APS 的 Pinned 型感光区建模

首先, 对 4 管有源像素传感器(Active Pixel Sensor, APS)像元感光区结构进行建模分析, 4T-APS 结构如图 1 所示. 主要包括收集光生电信号的 PPD; 将光信号转化为电信号的悬浮扩散区(Floating Diffusion, FD); 控制电荷从 PPD 转移到 FD 节点的 TG; 负责在电荷转移前将 FD 节点复位的复位管 M_r; 将光电信号有源化读出的源跟随器 M_{sf}; 以及将信号送至列总线的行选管 M_{sc}. 它的工作过程为: 首先进入复位状态, TG 关闭, M_r 打开, 通过 FD 节点对 PPD 复位, 使之全耗尽; 然后进入积分曝光状态, M_r 关闭, 光照射到 PPD 结构表面, 在 PPD 中

产生光生载流子,收集在 N+区的光生电子在 TG 打开后,传输到 FD 节点,并通过源跟随器 M_{sf} 放大输出;最后进入读出状态,行选开关 M_{sc} 打开,信号通过列总线输出。

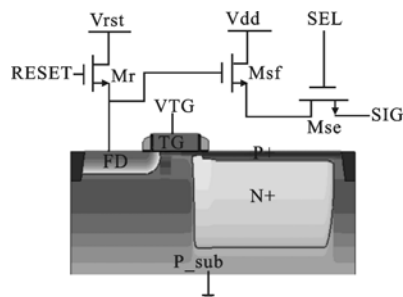


图1 PPD型CMOS图像传感器像元结构

单个PPD型光电二极管结构如图2所示,该结构由两个PN结构成,一个为P+/N结,另一个为N/P_sub结,由耗尽区宽度表达式:

$$W = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right) (V_{bi} - V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

可知,当PN结所加反偏电压越大时,耗尽区宽度W越大,又根据量子效率QE与耗尽区宽度的关系式^[3]:

$$QE = (1 - R_f) e^{-\alpha d} (1 - e^{-\alpha W}) \quad (2)$$

可知,增大耗尽区宽度可以提升量子效率。其中, R_f 为复合率, α 为入射光在半导体中的吸收系数, d 为入射光进入半导体的深度, λ 为波长,W为耗尽区宽度。

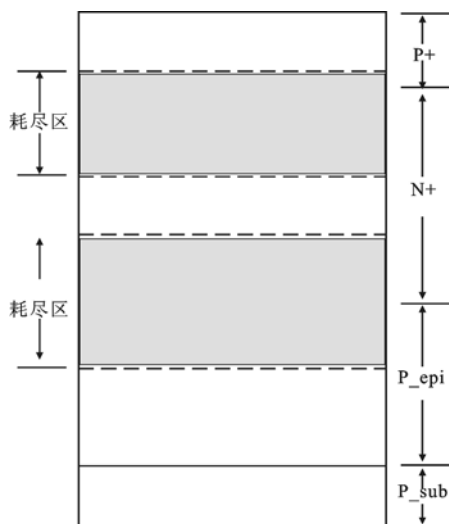


图2 PPD型光电二极管结构

然而对于CMOS图像传感器中收集光信号的PPD,还必须考虑传输管下沟道的漏电对QE的影响。理想情况下,假设TG无漏电,光照PPD一定时间后,光生电子数达到饱和,随着光照时间的增加,

PPD区电子数不再随时间变化。实际器件中TG存在亚阈值漏电,使得TG管关闭的情况下,有一部分电子漏到FD节点,降低了PPD满阱能力。令 N_{max} 为PPD区收集的光生电子数的最大值, $N_{leakage}$ 为从TG漏掉的电子数, N_{ph} 为入射光子数, N_{sig} 为信号电子数,它们有如下关系:

$$N_{max} - N_{leakage} = N_{sig} \quad (3)$$

一般地,量子效率可以根据光电二极管中光生电子被像元捕获的数目与入射到像元表面的光子数之比得到,它由下式给出^[4]:

$$QE(\lambda) = \frac{N_{sig}}{N_{ph}} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知,TG漏电增大时, N_{sig} 减小,从而导致QE减小。

由上面的理论分析可以看出,提升量子效率主要有两种途径,一是通过改变PPD形状,增大PPD耗尽区;二是减小TG管漏电,提高PPD耗尽区的电荷收集能力。文献[5]中介绍了改善PPD耗尽区电容从而提高量子效率的一种新结构。本文主要针对TG管漏电,对像元TG管进行优化。

对于PPD结构最上面的P+薄层,离子注入时,由于横向浓度梯度的存在,改变了TG下靠近P+层的掺杂浓度,从而影响TG亚阈值漏电。同时,由于阈值注入调整会对阈值电压产生影响,阈值电压不能太低,否则当栅压为0时,器件仍不能完全关断;阈值电压也不能太高,否则器件的驱动电流会很小。为了兼顾以上两个要求,从工艺角度,可以通过对P+掺杂浓度进行调整来减小TG漏电流,避免对阈值电压的影响。

3 光电特性仿真及验证

对于本文研究的器件,阈值注入浓度在 $3.5E16 \sim 8E16 \text{ cm}^{-3}$ 时,阈值电压都满足在 $1.0 \sim 1.2 \text{ V}$ 范围内,因此选取阈值注入浓度为 $5.5E16 \text{ cm}^{-3}$ 。基于TCAD仿真平台以及 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS工艺,分别对不同的P+掺杂浓度进行亚阈值漏电仿真,结果如图3所示。

由图3可以看出,随着P+掺杂浓度的增大,TG亚阈值漏电流先减小,当P+掺杂浓度达到 $1.7E18 \text{ cm}^{-3}$ 时,亚阈值漏电开始保持不变。考虑到N区要达到全耗尽状态,P+/N结必须为突变结,p+掺杂浓度不能太小,因此选取 $1.5E17 \text{ cm}^{-3}$ 为优化前P+掺杂浓度, $1.7E18 \text{ cm}^{-3}$ 为优化后P+掺杂浓度,对优化前后器件进行光照积分过程仿真,仿真

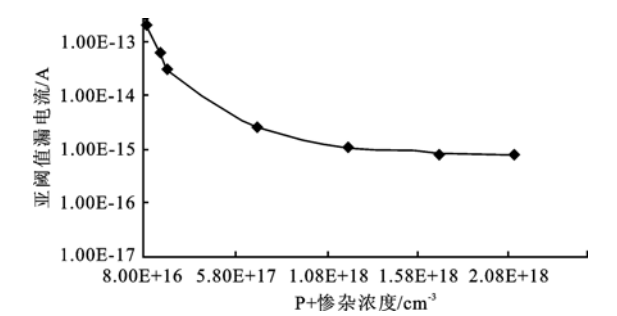


图 3 亚阈值漏电流随 P+掺杂浓度的变化曲线
条件如表 1 所示. 仿真所加激励时序如图 4 所示.

表 1 优化前后器件参数				
	感光区尺寸/ μm^2	TG 栅压/ V	P+掺杂浓度/ cm^{-3}	阈值注入浓度/ cm^{-3}
优化前	1.2×1	3.3	1.5E17	5.5E16
优化后	1.2×1	3.3	1.7E18	5.5E16

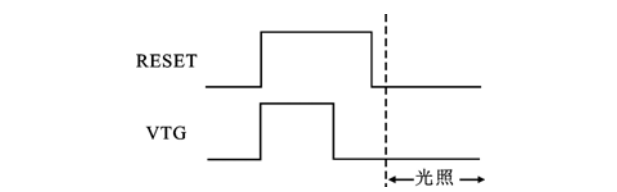


图 4 光照积分过程仿真时序

分别截取优化前后光照过程中像元电子流密度分布剖面图如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 优化前光照过程中 TG 下有较高的漏电流, 优化之后, 光照过程中 TG 栅下漏电流大大减小, 与本文分析一致.

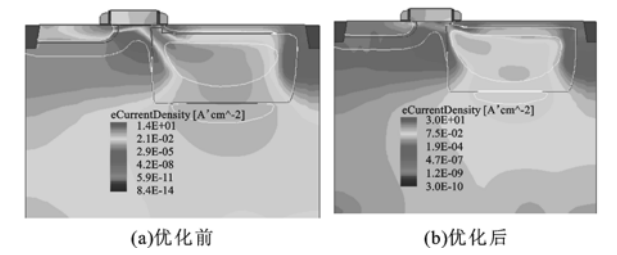


图 5 优化前后,光照过程中电子流密度分布剖面图

入射光强设置为 $0.5\text{ W}/\text{cm}^2$, 分别对波长 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm、650 nm、700 nm、750 nm 以及 800 nm 进行光照积分过程仿真. 光照过程中, 耗尽区电子密度随光照时间的变化曲线如图 6 所示.

从图 6 可以看出, 光照开始后, 随着光照时间的增加, PPD 耗尽区电子密度先线性增加, 而后开始保持不变, 说明耗尽区电子饱和. 饱和后, 优化后的结构电子密度明显高于优化前, 即优化后的结构产生更多的光生电子.

对于特定波长和光强的入射光, 一定时间内入射到光电二极管表面的光子数可以由式(5)得到

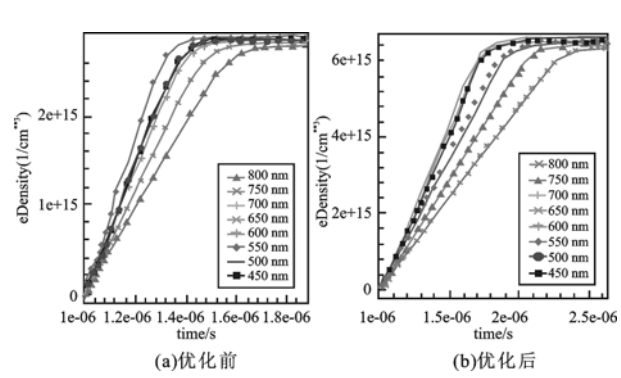


图 6 优化前后,PPD 结构耗尽区
电子密度随光照时间变化曲线

$$\mu_p = 50.34 \times A \times t_{\text{exp}} \times \lambda \times E \quad (5)$$

式中, A 为感光区面积, 单位为 μm^2 ; t_{exp} 为曝光时间, 单位为 μs ; λ 为波长, 单位 nm; E 为入射光功率, 单位 W/cm^2 .

耗尽区电子数可以由下式给出:

电子数=电子密度×体积 (6)

电子密度如图 6 所示, 由式(6)可以算出光照之前与光照饱和之后耗尽区电子数, 两者之差为光生电子数, 再由式(4)、式(5)可以计算得到量子效率 QE, 如表 2 和图 7 所示.

表 2 光强 $0.5\text{ W}/\text{cm}^2$ 时,不同波长量子效率仿真结果					
波长/nm		光照饱和的时间/ μs	入射光子数	光生电子数	QE/%
450	优化前	0.668	5 296	3 520	66.4
	优化后	1.144	11 417	7 943	69.6
500	优化前	0.605	5 286	3 556	67.0
	优化后	1.105	9 734	8 004	82.2
550	优化前	0.568 8	5 504	3 567	64.8
	优化后	1	9 690	8 021	82.8
600	优化前	0.62	6 554	3 556	54.3
	优化后	1.101	11 639	7 993	68.7
650	优化前	0.67	7 673	3 528	46.0
	优化后	1.093	12 517	7 999	63.9
700	优化前	0.768	9 472	3 509	37.0
	优化后	1.293	15 947	7 916	49.6
750	优化前	0.818	10 809	3 474	32.1
	优化后	1.55	20 482	7 848	38.3
800	优化前	0.868	12 235	3 431	28.0
	优化后	1.797 7	25 329	7 782	30.7

由表 2 与图 7 可知, 优化后, 阱容从优化前的 3500e^- 左右增大到 7900e^- 左右, 450 nm 到 800 nm 之间波长范围内, 量子效率优化后比优化前有了明显的提升. 且对波长为 550 nm 的入射光, 优化后量子效率提高了 27.8%.

(下转第 125 页)

迭代或终止.

6 结束语

实验结果表明,本文提出的方法是可行的,结合SURF和互信息对图像进行配准可以有效地减少计算量,加快配准速度同时又不受光照和噪声的影响,使配准更加精确,进而提高了配准的稳定性和可靠性.为进一步对图像的研究做好了基础.

参考文献:

- [1] Zhu Ying-xuan, Cheng Samuel, Vladimir Stankovic. Image registration using BP-SIFT[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 22(4): 448-457.
- [2] 冯雪芳,吴锡生. 基于归一化边缘互信息与自适应加速粒子群的图像配准方法[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(1):119-123.
- [3] 刘鹏,周军,罗德志,等. 基于互信息及蚁群算法的红外与可见光图像配准研究[J]. 微计算机应用, 2008, 29(10):53-58.
- [4] 洪明坚,吕建斌,杨丹,等. 一种新的基于互信息的图像配准方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(6): 697-700.

- [5] 程有娥. 基于角点特征和最大互信息的图像配准[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(6): 186-190.
- [6] Bay Herbert, Tuytelaars Tinne, Cool Luc Van. SURF:speeded up robust features[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [7] Viola P, Jones M J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[C]//Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Uision and Pattern Recognition. Kauai, HI, USA:IEEE,2001:511-518.
- [8] 刘林,黄英,贺振华. 基于一种改进的Powell算法和互信息的医学图像配准方法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2013(2):78-80.

作者简介:

侯一民 男,(1978—),博士,副教授.研究方向为图像处理与模式识别.

陈祉如 女,(1988—),硕士研究生.研究方向为图像处理与模式识别.

刘鹏德 男,(1988—),硕士研究生.研究方向为图像处理与模式识别.

(上接第121页)

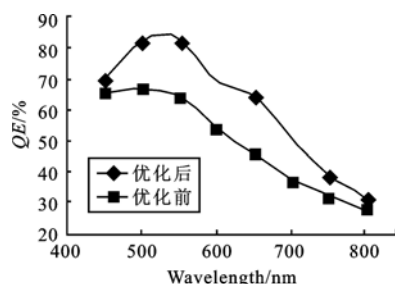


图7 优化前后,量子效率与波长关系曲线

4 结束语

本文针对影响CMOS图像传感器中PPD量子效率的因素进行了定量分析,指出了4T-APS像元中传输管漏电对量子效率的影响.在不改变PPD结构的前提下,调整常规CMOS工艺中P+注入和阈值注入浓度,提升了阱容,改善了可见光范围内入射光波的量子效率.最后,利用TCAD器件仿真工具验证了构造的4TAPS结构其量子效率优化方案的可行性.本文的研究结论对PPD型4T-APS像元结构的光电特性优化设计具有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 倪景华. 提高CMOS图像传感器灵敏度的工艺优化方法[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [2] Yue Chen, Xinyang Wang, Adri J. Mierop. A CMOS image sensor with in-pixel buried-channel source follower and optimized row selector[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(11):2390-2397.
- [3] Adam Godbeer. Investigation of 4T CMOS image sensor design and the effects of radiation damage[D]. [s. l.]:University of Surrey,2010:17-18.
- [4] Liu Wei-Jean. A CMOS photodiode model[C]//Proc of the 5th IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. Santa Rosa, CA: IEEE, 2001:102-105.
- [5] 李伟平. 4T像素设计与性能优化[D]. 天津:天津大学,2011:37-40.

作者简介:

李 妍 男,(1986—),硕士研究生.研究方向为CMOS图像传感器像元设计.