

TDI 图像传感器横向抗晕栅极电压与满阱容量关系研究

曲 杨^{1,2}, 王欣洋^{1,2}, 周 泉³, 常玉春⁴

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 长光辰芯光电技术有限公司, 长春 130033; 4. 大连理工大学 微电子学院, 大连 116600)

摘 要: 时间延时积分 CMOS 图像传感器(TDI-CIS)具有优良的微光探测能力,可应用于航空探测及卫星遥感等领域。然而,在入射光强较强时,TDI-CIS 容易出现光晕(Blooming)现象,影响观测效果。首先分析了光晕产生的机理;然后基于两种传统的抗晕结构,设计出一种具有沿垂直方向布局的长方形横向抗晕栅的 TDI-CIS;通过成像实验发现横向抗晕栅极电压与抗晕效果及满阱容量(FWC)之间呈负相关关系;最后通过实验得到所设计 TDI-CIS 的最优抗晕栅极电压值为 2.1 V。

关键词: 时间延时积分; CMOS; 光晕; 横向抗晕栅; 满阱容量

中图分类号: TN386.1 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0169-04

Relationship between Voltage of Lateral Anti-blooming Gate and Full Well Capacity in TDI Image Sensor

QU Yang^{1,2}, WANG Xinyang^{1,2}, ZHOU Quan³, CHANG Yuchun⁴

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Gpixel. Incorporation, Changchun 130033, CHN;
4. School of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116600, CHN)

Abstract: Due to its excellent detection ability under low light illumination, time delay integration CMOS image sensor (TDI-CIS) can be applied in aviation detection and satellite remote sensing. However, it is easy to appear blooming phenomenon to affect observation when TDI-CIS is under higher intensity illumination. In this paper, the mechanism of blooming is introduced firstly and a TDI-CIS with rectangle lateral anti-blooming gate which is arranged in vertical direction based on two different anti-blooming structures is designed. Imaging tests indicate that the voltage of anti-blooming gate (V_{ABG}) is negatively corrected with anti-blooming and full well capacity (FWC). Finally, the optimal V_{ABG} of 2.1 V is obtained.

Key words: TDI; CMOS; blooming; lateral anti-blooming gate; FWC

0 引言

随着半导体工艺技术的飞速发展,将电荷耦合器件(CCD)和 CMOS 集成于同一芯片成为可能。时间延时积分 CMOS 图像传感器(Time Delay Integration CMOS Image Sensor, TDI-CIS)采用

CCD 作为感光器件,集成了 CMOS 读出电路,通过调节积分时间以及 TDI 级数来实现对不同光强目标的观测。与传统 TDI CCD 相比,TDI-CIS 有着低功耗及高集成度的优势,成为高分辨率遥感相机的核心器件^[1]。

在实际应用中,TDI CMOS 图像传感器在接收到强光信号时极易产生光晕(Blooming)现象,影响

收稿日期:2019-12-23.

基金项目:国家自然科学基金项目(11975066).

观测效果。如通过探测器观测地球表面时,成像范围内不同物体之间较大的光强差会导致光晕的产生,难以获得理想的清晰图像。

本文针对光晕现象,提出并设计了一种带有横向抗晕栅(ABG)结构像素的 TDI-CIS,测试并分析抗晕效果与满阱容量(FWC)之间的关系,得出该图像传感器的最优抗晕栅极电压值。

1 光晕

1.1 光晕的影响及消除方法

当 CCD 图像传感器接收到强光信号,其收集的光生电子数超过 FWC 时会溢出到邻近像素中。如图 1 所示,手电筒发光区域光线过强,过剩的电子溢出到垂直方向上的邻近像素,出现光晕现象,使得图像中手电筒发光区域出现严重失真^[2]。光晕不仅严重影响成像效果,而且会导致光晕区图像数据受到无法经过后期处理恢复的永久性损伤。



图 1 强光下图像产生光晕

目前有两种主流抗晕结构,第一种为垂直抗溢出漏极(Vertical Anti-Blooming Drain, VABD)抗晕结构,通过对衬底施加反向偏置电压,使衬底势垒小于邻近 Gate。当产生的电子数达到 FWC 时,这个势垒差将促使过剩电荷垂直地导入衬底(此时衬底充当 VABD)。这种设计不会影响填充系数,但会减小感光区的深度,从而影响传感器对于长波光的吸收^[3]。在此结构中,由长波光激发在像素深处产生的光电子会直接被垂直抗溢出漏极吸收^[4-6]。另一种为横向抗溢出漏极(Lateral Anti-Blooming Drain, LABD)抗晕结构,将抗溢出漏极和 ABG 集成到 CCD 像素中。当 ABG 打开后,由于其下面势垒小于邻近 Gate 下的势垒,溢出的电荷将流入 LABD,从而达到抗晕的效果。但这种结构设计会占用传感器有效像素区域,降低传感器的填充系数和灵敏度。本文中,为了保证传感器对于长波光的

吸收,采用 LABD 设计。以上两种结构均是通过集成抗溢出漏极于像素结构中,将过剩电荷导出以消除其对邻近像素的影响。抗溢出漏极只会防止过剩电荷流入邻近像素,并不会对其他像素造成影响。

1.2 横向抗晕栅极电压与满阱容量的关系

如图 2 所示,由于 $FWC \propto H \times L$,横向抗晕栅极开启电压 V_{ABG} 的大小将影响像素的 FWC。减小 V_{ABG} 会提升 ABG 下势垒 H ,进而增加满阱容量,但在极强光照下,过窄的溢出通道会降低电荷的导出效率,依然有电荷溢出到邻近像素的风险。较大的 V_{ABG} 虽然可以保证抗晕效果,但会使 H 减小,进而降低像素的 FWC,使图像传感器的动态范围降低。因此,在尽可能保证大满阱的条件下找到使抗晕功能完全打开的 V_{ABG} 具有重要的研究意义。

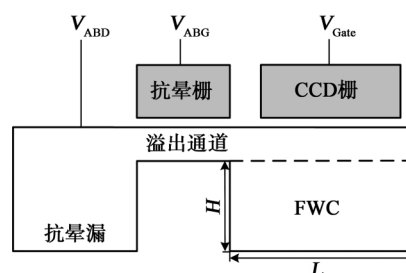


图 2 LABD 结构示意图

2 图像传感器设计

2.1 像素设计

本文设计的图像传感器像素原理图如图 3 所示,感光区域采用 CCD 工艺,在曝光时间内,光生电子在 CCD Gate 下生成、存储并传递,而后越过溢出栅(Overflow Gate, OG)传输至浮置节点电容(Floating Diffusion, FD)内等待读出。读出电路采用 CMOS 工艺,在选择开关 SEL 开启后,FD 内的电荷经源极跟随器(Source Follower, SF)放大后转

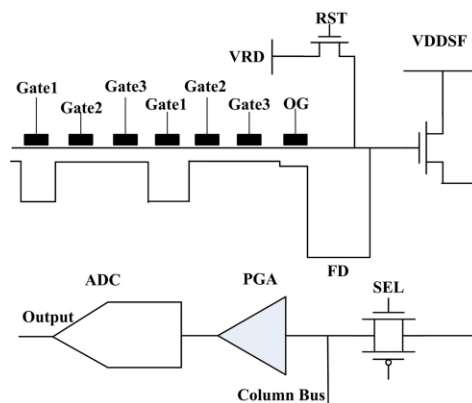


图 3 像素原理图

换成模拟信号,而后经模数转换器(Analog-Digital Converter, ADC)和可编程增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)处理后以数字信号读出。

2.2 横向抗晕结构设计

如图 4 所示,为了降低工艺风险,本文将 ABG 设计成沿垂直方向布局的长方形,每个 CCD Gate 两侧各有一个 ABG 来保证抗晕效果。此外,位于同一列的 CCD Gate 共用同一个 ABG,每两个相邻 ABG 共享一个 ABD。相较于其他 ABG 布局,长方形设计更易于实现,而且不会对电荷传输效率(CTE)产生影响。除此之外,ABD 的存在会进一步提升列间像素的隔离效果。

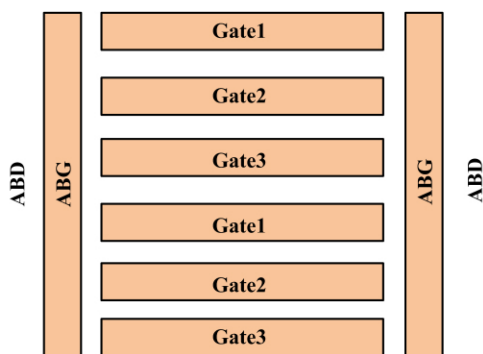


图 4 带有纵向抗晕栅的像素设计

2.3 测试图像传感器

图 5 和图 6 分别为设计的 TDI CMOS 图像传感器的宏观照片和设计框架图,其像素尺寸为 $5\ \mu\text{m}$,像素阵列为 $4\ 096 \times 100$,采用 $180\ \text{nm}$ 工艺制造,正照设计。

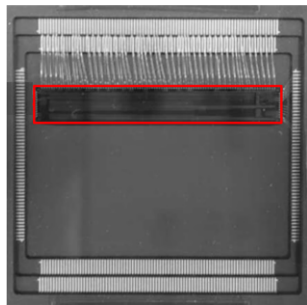


图 5 图像传感器宏观照片

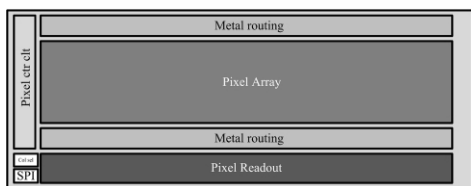


图 6 图像传感器设计框架图

3 评估方法与数据分析

3.1 满阱容量计算方法

满阱容量的计算公式为^[7]

$$FWC = \frac{S_{\text{Light}} - S_{\text{Dark}}}{1000C_{\text{vg}}} \quad (1)$$

其中, S_{Light} 为取光子传输曲线(Photon Transfer Curve, PTC)最高点所对应数字量化值(Digital Number, DN); S_{Dark} 为初始输出 DN 值; C_{vg} 为 PTC 斜率,即转换效率。

理论上,由于本实验中设置 V_{ABG} , C_{vg} 和 S_{Dark} 为固定值,通过对比不同电压下的 PTC 顶点位置即可判断满阱容量的变化趋势。

3.2 抗晕评估方法

成像实验以溴钨灯作为光源,光线依次经过积分球、靶条及镜头对焦于测试像素,形成条形光斑。在 $V_{\text{ABG}} = 0\ \text{V}$ 时调节光强使条形光斑产生光晕,如图 7(a)所示。而后保持光强不变,调节 V_{ABG} ,观察成像区域邻近像素的输出图像以判断抗晕效果。位于同一行的像素由于有浅槽隔离^[8]和 ABD 的存在,图像上出现的横向光晕并不明显,可忽略不计。

3.3 结果分析

根据上述抗晕评估方法可得到光晕随 V_{ABG} 的变化规律。如图 7(b)和(c)所示,光晕的长度随 V_{ABG} 的增加逐渐缩短,在 V_{ABG} 为 $1.9\ \text{V}$ 时光晕已接近消失,在 V_{ABG} 为 $2.1\ \text{V}$ 时光晕完全消失,继续增大 V_{ABG} ,光晕不再有明显变化。由于光晕的长度随 V_{ABG} 的增加持续缩短,此处已省略光晕消失之前的图像。

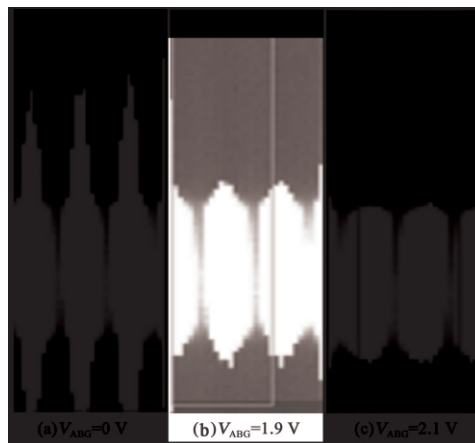


图 7 光条随 V_{ABG} 的变化

PTC 随 V_{ABG} 的变化如图 8 所示。随着 V_{ABG} 的增加,顶点呈持续下降趋势。由于只改变了 V_{ABG} ,

各 PTC 的起始点与顶点之前的部分重合度较高,即 C_{vg} 为一固定值,符合理论分析。当 V_{ABG} 在 $0 \sim 1$ V 的范围内变化,PTC 顶点下降明显,此时以牺牲 FWC 为代价,ABD 已经可以有效地将过剩电荷导出,但由于溢出通道过窄无法完全消除光晕,还应继续增大 V_{ABG} 。在 V_{ABG} 为 2.1 V 时光晕消失,FWC 达到最小值 114.96 ke^- ;在 V_{ABG} 为 0 V 时 FWC 最大,为 145.67 ke^- 。两者相差约 30 ke^- 。

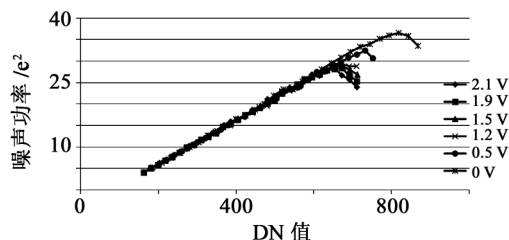


图 8 不同 V_{ABG} 下的 PTC 曲线

从理论分析和实验测试可知,TDI-CIS 的抗晕能力与 V_{ABG} 成正相关关系,FWC 与 V_{ABG} 成负相关关系,随着 V_{ABG} 的增加,抗晕效果愈发明显。本文所设计的图像传感器在 V_{ABG} 为 2.1 V 时达到了两者的最佳平衡,此时满阱为 114.96 ke^- 。对于实际应用而言, V_{ABG} 的大小应由图像传感器的工作环境和观测目标的特性决定,设计者需要在强抗晕能力和高动态范围之间进行折中。

4 结论

本文从光晕现象的产生原理出发,首先对比分析了两种主流抗晕结构的优缺点,然后设计出具有沿垂直方向布局的长方形 LABG 像素的 TDI CMOS 图像传感器。通过在恒定光强下调节 V_{ABG} ,观察抗晕效果以及对应 FWC 的变化。分析实验结果可知,在 V_{ABG} 提升至 2.1 V 时达到最佳抗晕效果。同时,FWC 从 V_{ABG} 为 0 V 时的 145.67 ke^- 减小到 V_{ABG} 为 2.1 V 时的 114.96 ke^- 。

(上接第 168 页)

- [12] Luo L B, Hu H, Wang X H, et al. A graphene/GaAs near-infrared photodetector enabled by interfacial passivation with fast response and high sensitivity[J]. J. Mater. Chem., 2015, C3: 4723-4728.
- [13] Lu Y, Feng S, Wu Z, et al. Broadband surface plasmon resonance enhanced self-powered graphene/GaAs photodetector with ultrahigh detectivity[J]. Nano Energy, 2018, 47: 140-149.

参考文献:

- [1] 廖乃钺,刘绪化,刘昌林,等. 横向抗弥散多光谱 TDI CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 17-19.
Liao Naiman, Liu Xuhua, Liu Changlin, et al. Multispectral TDI CCD imaging sensors with lateral anti-blooming ability[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 17-19.
- [2] Quantum Imaging. inc. Anti-blooming [DB/OL]. 2014-04-15. <https://quantumimaging.com/anti-blooming>.
- [3] Nakamura Junichi. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras[M]. America: Taylor & Francis, 2006: 79-91.
- [4] 武利翻. CCD 纵向抗晕结构设计及优化[J]. 现代电子技术, 2010, 33(16): 172-174.
Wu Lifan. Design and optimization of CCD image sensor with vertical anti-blooming structure [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(16): 172-174.
- [5] 武利翻. CCD 图像传感器抗晕技术研究[J]. 传感器世界, 2010, 16(8): 16-19.
Wu Lifan. Research on anti-blooming technology in CCD image sensors[J]. Sensor World, 2010, 16(8): 16-19.
- [6] 米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 陈榕庭, 彭美桂, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS Image Sensor No Kiso to Ouyou[M]. Chen Rongting, Peng Meigui, Transl. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] Wang Xinyang. Noise in sub-micron CMOS image sensors [D]. Delft: Delft University of Technol., 2008.
- [8] 闻黎,王建华. 新型集成电路隔离——STI 隔离[J]. 微纳电子技术, 2002, 39(9): 11-12.
Wen Li, Wang Jianhua. New isolation technology of IC: STI isolation[J]. Micronanoelectronic Technology, 2002, 39(9): 11-12.

作者简介:

曲杨(1993—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为 TDI CMOS 图像传感器;

王欣洋(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,主要研究方向为 CMOS 图像传感器设计。

E-mail: wangxinyang@ciomp.ac.cn

作者简介:

陶泽军(1993—),男,硕士生,主要研究方向为基于碳纳米材料/GaAs 异质结光伏型光电探测器;

苏言杰(1982—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为碳基纳米材料及纳米器件。

E-mail: yanjiesu@sjtu.edu.cn