

二相驱动帧转移型 CCD 电荷溢出现象分析及解决方法

刘 懿^{1,2} 周 青^{1,2} 尹达一¹

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 CCD 接收到过强信号时会出现电荷溢出现象, 对于无溢出漏级结构的 CCD, 需合理设置成像系统参数避免出现电荷溢出。针对滨松帧转移型 CCD 对非强目标成像时出现的电荷溢出现象, 分析其原因是由行读出过程中成像区长时间电荷积累而导致的, 通过积分之前的多次帧转移, 有效解决了电荷溢出问题, 并基于积分球实验进一步论证了原因及解决方法。

关键词 光电子学; CCD; 电荷溢出; 成像控制; 积分球实验

中图分类号 TN386.5 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.080401

Analysis and Solution of Two-Phase FT-CCD Charge Overflow Phenomenon

Liu Yi^{1,2} Zhou Qing^{1,2} Yin Dayi¹

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

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

Abstract Charge overflow phenomenon will arise when CCD is receiving strong signals. With CCD without overflow drains, the parameters of the imaging system have to be set properly to avoid charge overflow. Based on the charge overflow phenomenon when using HAMAMATSU Frame-Transfer CCD to image not so strong targets, according to the paper, it is caused by the long-time charge accumulation of the image section during line readout process. To remove the overflow signal effectively, multiple frame transfers are carried out before integration time. Integrating sphere tests are also performed to testify the reason and the solution.

Key words optoelectronics; CCD; charge overflow; imaging control; integrating sphere tests

OCIS codes 040.1520; 040.1490; 110.2960; 120.3150

1 引言

电荷耦合器件(CCD)将电荷作为信号载体, 具有高灵敏度、低噪声、大动态范围等优良特性, 在科学及工业界都得到了广泛的应用, 尤其是在高性能的图像传感领域。CCD 在接收高强度光信号时会产生电荷溢出(blooming)现象, 通常表现为图像中出现向周围扩散的白色区域, 并出现柱状或线状的白道, 这种现象将导致真实的目标信号淹没在溢出信号之中, 严重影响成像质量和压缩动态范围, 因此在利用 CCD 成像时要避免电荷溢出现象的发生。

对 CCD 的 blooming 现象抑制的研究主要从 CCD 的结构上进行改进^[1-3], 通过增加溢出漏极能够将过溢电荷有效地吸收, 基于同样的原理能够实现电子快门。本实验所研究的滨松二相驱动帧转移型 CCD 不具备溢出漏极, 在对非强目标进行实际成像时出现了电荷溢出现象, 对此现象进行了分析并提出了有效的解决方法, 最后通过积分球测试实验进行了验证。

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-25; 网络出版日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 刘 懿(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光电系统方面的研究。E-mail: liuyi87@hotmail.com

导师简介: 尹达一(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间紫外成像和光谱技术等方面的研究。

E-mail: yindayi@mail.sitp.ac.cn

2 Blooming 和 anti-blooming 技术

CCD的基本结构是,金属-氧化物-半导体(MOS)电容器,当不同电压施加于不同电极上即形成了势阱,电荷由此能够在势阱中进行累积,累积的电荷在MOS半导体之间连续转移到输出放大器进行读出,因此CCD成像本质上即是光生电荷的积累和转移输出的过程^[4],其所能容纳的最大电荷量称之为满阱容量,其光生电子数 N 可表示为

$$N = \frac{\pi X_{\text{det}}^2 T_{\text{int}}}{4F^2 hc} \int L(\lambda) \eta(\lambda) \tau(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (1)$$

式中 X_{det} 为CCD像元尺寸, T_{int} 为积分时间, λ 为波长, $L(\lambda)$ 为目标辐亮度, $\eta(\lambda)$ 为CCD的量子效率, $\tau(\lambda)$ 为光学效率, F 为光学 F 数, h 和 c 分别代表普朗克常数和光速。

Blooming现象指的就是当注入像元的光子数远远超过其饱和阈值,导致信号电荷超过了满阱容量,过量的电荷就会溢出到相邻的像元和垂直移位寄存器,其扩散形式与CCD的结构相关^[5]。**Anti-blooming**技术的研究主要从改进CCD的结构上来实现,其抑制电荷溢出方法是增加溢出漏级,将溢出的过量电荷吸收,阻止其扩散到相邻的像元。漏级实现结构分为横向^[1]和纵向^[2]两类,溢出漏级的抑制能力与外加电压、漏级势垒、溢漏排放能力有关^[3]。通过**anti-blooming**技术可有效抑制**blooming**现象,不过同时也带来了一定的问题,溢出漏级需要施加的溢出电压和溢出门电压会降低满阱的容量、影响CCD量子效率^[6]。当**anti-blooming**电压设为高时,所有的信号电荷能够清除,基于这一功能可以有效实现电子快门技术。电子快门技术能够灵活控制曝光时间,每个像元在电荷复位脉冲的作用下会进行复位并开始新的电荷积累,因此能有效减小图像模糊,防止曝光饱和等问题^[6]。

对于不具备**anti-blooming**技术的CCD,其制作工艺更为简单,器件成本更低,成品率更高,满阱容量和量子效率不会受到溢出漏级的影响;不过在成像过程中要避免强信号带来的电荷溢出的干扰,因此需要合理选取成像系统关键参数,包括积分时间、镜头光圈等。针对滨松背照式帧转移型面阵CCD S7986的成像控制展开研究,其主要参数如表1所示。

表1 S7986主要参数特性

Table 1 Main characteristics of S7986

Parameter	Specification
Pixel size	14(H) μm \times 14(V) μm
Number of total pixels	680(H) pixel \times 500(V) pixel
Spectral response range	200~1100 nm
Vertical/horizontal clock phase	2-phase
CCD node sensitivity	2.0 $\mu\text{V}/e^-$
Full well capacity	65 ke ⁻ (vertical) 130 ke ⁻ (horizontal)
Transfer efficiency	0.99999

3 CCD成像实现和 blooming 现象分析及解决方法

帧转移型CCD(FT-CCD)由成像区和存储区组成(如图1所示),在光积分期,成像区进行光电转换积累电荷,在场消隐期,累积的电荷在驱动时钟的作用下快速转移到存储区相应的位置,在行消隐期,存储区的电荷逐行垂直转移到水平串行寄存器并逐元转移到输出放大器,将电荷转换为电压进行读出^[7]。因此,FT-CCD具备较高的填充因子,在电荷完全转移到存储区之后即可进行下一次的成像电荷积累,这种设计可以不需要机械快门,而且能同时进行电荷积累与读出,高灵敏度、高帧频、大尺寸的CCD有相当比例都是帧转移型的。

CCD成像控制采用VHDL语言编写状态机来实现帧转移、行转移和行读出的时序驱动。在无机械快门的条件下,若按CCD数据手册提供的工作时序,实际的积分时间包含了光积分时间、行转移和行读出时间,但是行读出时间占主要地位,本文行读出频率取为1 MHz,其行读出时间可表示为

$$t = m \cdot n/f, \quad (2)$$

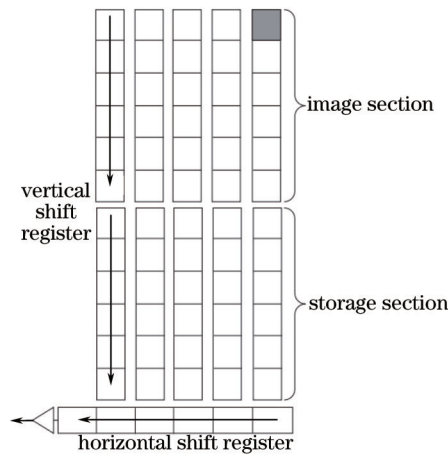


图1 FT-CCD 结构图

Fig.1 Structure of FT-CCD

式中 m 为像元行数, 取为 500, n 为行读出串行寄存器数目, 取为 684, f 为读出频率, 算得行读出所需用时为 342 ms, 可知积分时间将严重受到行读出的制约, 因此对成像流程进行了调整, 在图像成像过程中先进行一次帧转移, 将成像区在上一次读出过程中积累的剩余电荷移出, 这样在积分开始前成像区内没有累积的信号电荷; 积分时间结束时, 再进行一次帧转移操作, 快速将成像区内累积的信号电荷转移到存储区, 这样实际积分时间与光积分时间相同, 与行转移和行读出过程无关; 然后再将存储区的信号电荷进行行转移和行读出得到实际的成像结果, 成像控制流程如图 2 左侧所示。在实际成像的过程中, 成像效果如图 3 上方所示, CCD 在目标信号并不强的情况下成像出现了类似 blooming 现象。

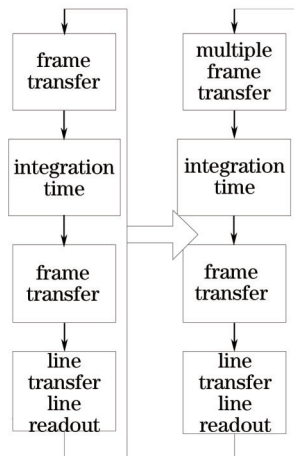


图2 CCD 成像控制流程

Fig.2 Control process of CCD imaging



图3 CCD 相机成像图

Fig.3 Images of CCD camera

分析可知, 由于所用 CCD 不具备 anti-blooming 漏极及电子快门, 采用图 2 左侧的控制方案来实现成像, 在行读出过程中, 成像区进行了长时间积分, 因此虽然目标信号并不强烈, 电荷长时间的累积依然产生了溢出, 从而导致出现了类强信号造成的 blooming 现象, 真实的目标淹没在溢出电荷信号当中。为解决这个问题, 在原成像控制方案的基础上进行改进, 在成像过程开始时先进行多次帧转移将之前积累的溢出电荷信号充分移除, 然后再进入到积分时间进行成像电荷积累, 如图 2 右侧所示。改进之后的成像效果如图 3 下方所示, 可见 CCD 的 blooming 溢出现象得到有效控制, 成功排除了过溢信号的干扰。

4 积分球实验

为进一步研究电荷溢出现象, 利用积分球对 CCD 相机成像(如图 4 所示), 观察记录 CCD 的电荷溢出现象与成像积分时间、积分球光强以及镜头光圈的关系, 实验结果如表 2 所示。对于一定的积分球电流(2.6 A)和镜头光圈 F 数(16), 不同成像积分时间 t_{int} 对于移除溢出电荷所需的帧转移次数 N 没有关系, 这也符合上述的

分析,溢出的电荷是在行读出阶段产生的,不受积分时间的影响。对于一定的积分球电流(2.6 A)和积分时间(1 ms),光圈 F 数越小,所需的帧转移次数越大, F 数越小对应光学系统的光圈越大,CCD接收到的光辐射通量也就越大,因此在行读出过程中成像区溢出电荷现象更为严重,所需的帧转移次数也越大。对于一定的光圈 F 数(16)和积分时间(1 ms),积分球电流越大,所需的帧转移次数越大,积分球电流越大对应目标辐射强度也越大,在行读出过程中CCD的溢出电荷现象也更为严重。移除溢出电荷所需要的帧转移次数与积分球电流和镜头 F 数的关系曲线如图5所示。

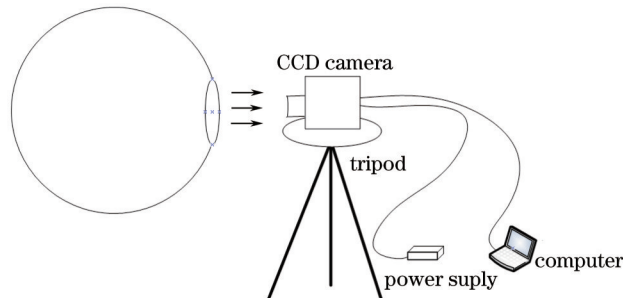


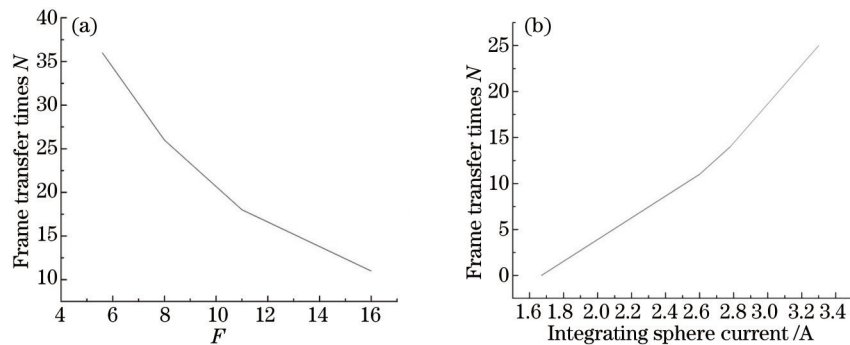
图4 积分球测试方法

Fig.4 Integrating sphere test method

表2 积分球测试结果

Table 2 Results of integrating sphere test

$I=2.6\text{ A}, F=16$		$I=2.6\text{ A}, t_{\text{int}}=1\text{ ms}$		$F=16, t_{\text{int}}=1\text{ ms}$	
t_{int}/ms	N	F	N	I/A	N
0.1	11	16	11	1.67	0
0.5	11	11	18	2.6	11
1	11	8	26	2.78	14
10	11	5.6	36	3.3	25

图5 帧转移次数 N 与(a)积分球电流和(b) F 数的关系曲线Fig.5 FT times relation with (a) integrating sphere current and (b) F

通过以上基于积分球的实验,证实了此CCD在对非强目标成像中出现的电荷溢出现象,正是由于行读出过程当中成像区长时间的电荷累积导致的,为避免此现象发生可通过多次帧转移将过溢信号移除。当然,随着CCD接收的光辐射强度增大,移除溢出电荷所需的帧转移次数增加幅度也更为明显,在成像过程当中对目标有效积分时间所占的比例也随之缩小,在驻留时间一定的条件下势必会影响最终目标信号的有效获取。

5 结 论

CCD的anti-blooming技术通过增加纵向或横向溢出漏级能有效解决电荷溢出问题。对于所研究的帧转移型CCD来说,不具备溢出漏极及电子快门,在对非强目标进行成像时出现了类似的电荷溢出现象,为解决这一问题,调整成像控制方案流程,在成像光积分开始前先进行多次帧转移移除溢出电荷信号。通过积分球实验研究了积分时间、镜头光圈、积分球光强对电荷溢出现象的影响,进一步证明了此现象是成像区在

长时间的行读出过程中导致的电荷溢出造成的。

参考文献

- 1 W F Kosonocky, J E Carnes, M G Kovac, *et al.*. Control of blooming in charge-couple imagers[J]. RCA Review, 1974, 35: 3-24.
- 2 Yasuo Ishihara, Eiji Oda, Hiroshi Tanigawa, *et al.*. Interline CCD image sensor with an antiblooming structure[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, ED-31(1): 83-88.
- 3 Zhong Sicheng, Cheng Shunchang, Wang Xiaoqiang. Design and process of the CCD with anti-blooming structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(3): 313-316.
钟四成,程顺昌,王晓强. CCD抗晕结构的设计和制作[J]. 半导体光电, 2011, 32(3): 313-316.
- 4 Pierre Magnan. Detection of visible photons in CCD and CMOS: a comparative view[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 504(1-3): 199-212.
- 5 Jaroslav Hynccek. Electron-Hole recombination antiblooming for virtual-phase CCD imager[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1983, ED-30(8): 941-948.
- 6 Wu Lifan. Research on and simulation of a CCD image sensor with a vertical anti-blooming structure[J]. Electronic Science and Technology, 2010, 23(8): 18-19, 24.
武利翻. 电子快门与 CCD 图像传感器抗晕的研究[J]. 电子科技, 2010, 23(8): 18-19, 24.
- 7 Thomas W McCrunin, Larry C Schooley, Gary R Sims. Signal processing for low-light-level, high-precision CCD imaging[C]. SPIE, 1991, 1448: 225-236.