



微光 EMCCD 超高速成像研究进展

余达^①, 刘金国^{①*}, 郭永飞^①, 周怀得^①, 李杰^②, 李明晶^②, 陈佳豫^①

① 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

② 长春大学电子信息工程学院, 长春 130022

* 联系人, E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

2013-05-28 收稿, 2013-07-18 接受

国家高技术研究发展计划(2008AA121803)、吉林省自然科学基金面上项目(201215107)和国家自然科学基金青年科学基金(61108066)资助

摘要 基于电子倍增电荷耦合器件(EMCCD, electronic multiplying CCD)的微光成像研究是当今的热点, 在航天应用中有明显的优势和广泛的应用前景. EMCCD 器件的电子倍增机制决定了其驱动具有高速高压的特点. 由于对图像信息获取速率的要求越来越高, 对驱动速度提出了更高的要求, 然而目前超高速驱动仍是尚未完全解决的难题. 总结了国内外 EMCCD 成像的研究进展, 针对其存在的不足, 提出了改良图腾柱、自耦态高频变压、集总参数电容串联谐振的驱动办法和宽范围精细调节、高效率、超低纹波具有可控上电初始态的电压转换方法, 并给出了在实验方面的最新结果. 最后对今后的研究工作进行了展望.

关键词

电子倍增
自耦态高频变压
集总参数电容
串联谐振
电压转换

在各种电荷耦合器件(CCD, charge couple device)中, 电子倍增电荷耦合器件(EMCCD, electronic multiplying CCD)以其体积小、灵敏度高的特点, 在高速、微光成像、高空间分辨率和高时间分辨率成像、自适应波前传感、暗弱天体的光谱观测、光干涉观测及快速测光等方面具有很好的应用前景^[1]. 目前, 国际上生产 EMCCD 的核心技术一直被英国 E2V 公司和美国 TI 公司牢牢掌握, 此两公司的产品特性各有千秋, 都可进行倍增增益调整, E2V 在噪声控制技术上优势明显, 而 TI 则在处理速度上更胜一筹^[2].

EMCCD 已经广泛应用于生物细胞探测^[3~5]、重离子 CT^[6]、X 射线探测^[7]、天文观测^[8]等领域. 近年来随着全球宇航事业的蓬勃发展, 在天体运动规律、天文观测、卫星遥测等领域的研究逐渐发展起来. 这些领域需要超低噪声的微光成像系统^[1], 在极微弱光条件下的成像技术成为航天相机研究的一个热点. 由于我国在基于空间平台对地球系统观测的探测技术比较落后, 发展自己的空间探测体系已迫在眉睫^[9]. EMCCD 具有卓越的微光探测性能, 可满足空间应用

要求. 其微光探测功能是通过在移位寄存器后面加入的增益寄存器, 对电荷信号进行放大来实现的. 这种特殊结构特点, 决定了 EMCCD 电子倍增的驱动信号具有高频率、高电压的特殊要求. 由于航天应用中苛刻的稳定性和可靠性要求, 也使 EMCCD 驱动实现困难. 航天 EMCCD 相机电子倍增超高速驱动机理研究集自动控制、信号与系统、模拟电路、信号发生与检测、半导体物理学、电磁学等多门学科知识交叉, 具有重要的学术价值.

1 传统方案的问题

针对微光应用, 国外开展了大量的研究. 对 EMCCD 与 ICCD、常规 CCD、红外器件、SCMOS 进行了性能对比^[10~12]; 展开了最佳倍增增益选择^[13]、图像的几何校验^[14]、光子计数法^[15~17]等理论方法的研究; 为获取彩色图像, 研究通过稀疏采样彩色滤光片来获得彩色图像^[18], 对 EMCCD 的光谱灵敏度进行评估^[19], 并与第三代夜视彩色相机进行性能比较^[20], 证明了 EMCCD 在微光应用领域有其独特的

引用格式: 余达, 刘金国, 郭永飞, 等. 微光 EMCCD 超高速成像研究进展. 科学通报, 2013, 58: 3777-3784

Yu D, Liu J G, Guo Y F, et al. Recent progress in low light level superspeed EMCCD imaging (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 3777-3784, doi: 10.1360/972013-430

地位.

国外已有几十家如 Andor 等公司生产和研制 EMCCD 相机, 可实现光子级计数, 但普遍设计较为保守, 不能满足某些特殊领域的应用需求^[21]. 针对 EMCCD 电子倍增的驱动方法, 美国纽约州立大学和英国谢菲尔德大学等采用图腾柱实现 EMCCD 驱动^[22~24]; 部分单位采用变压器来产生正弦的电子倍增驱动信号^[25,26]; 为欧南天文台项目研制的 OCam 相机中使用 DAC 和甲乙类放大器来实现任意波形驱动, 输出信号的稳定性达到 1 h 低于 1 mV 的漂移^[27]; 加拿大蒙特利尔大学也使用任意时钟发生器结合放大器进行驱动^[28,29].

为满足空间应用要求, E2V 公司及相关单位探索了 EMCCD 倍增增益老化的原因^[30], 并进行了 EMCCD 空间应用的耐辐射容限^[31]、Co-60 伽马射线的辐射效应^[32]、质子放射效应^[33]、连续工作的增益稳定性^[34]等研究, 研究表明太空中大多数的电离辐射对 EMCCD 的倍增机制没有明显的影响. 国外航天 EMCCD 相机的研究已进入应用阶段, 2010 年 11 月发射的 FASAT 卫星^[35,36]、2011 年 5 月已经运用于国际空间站的 AMS-02 设备^[37~39], 2012 年 6 月发射的高能 X 射线太空望远镜 NuSTAR^[40]和计划 2013 年发射的 Gaia 卫星均含有 EMCCD^[41,42].

EMCCD 在国外已形成产品并已成功应用, 但高端产品禁运; 要想打破国外长期的严密封锁, 必须自主研发, 且从方法原理上进行创新. 目前国内已相继开展了有关的空间探测和研究计划, 所搭载的仪器基本都以国外产品为主进行研制^[9], 我国有关单位只是在科学理论研究方面参与. 对于 EMCCD 的研究, 国内目前主要集中在整机的研制和理论分析阶段, 与国外先进水平还存在较大差距^[43].

中国科学院光电研究所王明富等人^[44,45]和张艳艳等人^[46]从理论上对 EMCCD 等几种光电传感器性能进行了比较, 采用直接数字合成器和高压放大模块设计了 EMCCD 驱动电路并分析了其噪声与驱动的关系; 中国科学院上海技术物理研究所谢宗宝等人^[47~49]设计了由隔离推挽的图腾柱和可调电源组成的驱动电路, 在环境温度为 25℃, 照度为 0.001 lux 时, 通过调整倍增电压对同一目标获得不同灰度的图像, 证明可实现增益可调; 昆明理工大学金建辉等人^[50,51]采用传统的图腾柱工作方式, 实现了工作频率为 10~40 MHz 的信号驱动, 探讨了对驱动信号质

量的影响因素; 北京空间机电研究所卜洪波等人^[52]采用直接数字频率合成和高速大幅值运放技术实现了以 EMCCD 为探测器件的星载遥感器焦面电路, 可在线进行 22.5°步长的相位调整和 0.01 V 分辨率的幅度调整; 南京大学孙静等人^[53]提出了将方波经滤波提取基频后经运放放大和变压器升压的驱动方法; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所何家维等人^[54]采用传统的图腾柱工作方式, 研制了基于 EMCCD 的导航星相机, 具备在积分时间 8 ms 以内探测 6 等星的能力, 其图像数据更新频率可达 10 frame/s.

上述报道的有关 EMCCD 研究, 为 EMCCD 的航天应用发展奠定了基础. 但倍增信号驱动多采用图腾柱和变压器, 也有少数采用专用模块或高压射频放大电路, 这些驱动方法在航天应用中有下列问题还未解决: 采用图腾柱驱动, 总的功耗与频率成线性关系, 高频应用时功耗大; 采用变压器输出信号参数受外部因素影响大, 高频工作时能量传输效率低; EMCCD 倍增时钟电极的集总参数电容随外界因素的变化规律尚不清楚, 航天可靠性和稳定性难以保证; 采用专用模块或高压射频放大电路等线性放大驱动方法设计复杂且功耗大, 易出现自激振荡; 倍增信号的峰值不稳定会引起倍增增益的波动, 需要精细控制; 输出电压调整采用开关方式升压结合模拟调压, 供电效率低^[23,24,48].

2 本小组理论研究进展

本小组对 EMCCD 的成像特别是驱动方法进行初步研究. 研究发现: (1) 可通过使图腾柱中两管交替导通来降低瞬时导通功耗从而降低总功耗^[55]; (2) EMCCD 倍增时钟电极的集总参数电容与外部形成谐振时, 当输入幅度很小的信号时就能获得幅度很大的倍增驱动信号^[56]; (3) 自耦高频变压器相比普通变压器能同时进行电能和磁能传输, 能在高频应用时传输更多的能量. 此 3 项研究结论为电子倍增信号的驱动方法提供了新途径.

根据现有理论知识和初步研究结果发现, 图腾柱的功耗由静态功耗、瞬时导通功耗和负载电容充、放电所产生的功耗 3 部分组成, 其中静态功耗和电路的偏置和结构有关, 是静态电流引起的功耗; 负载电容充、放电所产生的功耗与负载电容的容值 C_L 、信号频率 f 和电源电压 V_{DD} 的平方成正比, 如式(1)所示:

$$P_C = C_L V_{DD}^2. \quad (1)$$

瞬时导通功耗和电源电压及两管同时导通的时间有关, 如式(2)所示:

$$P_T = \frac{V_{DD}}{T} \left(\int_{t_1}^{t_2} i_T dt + \int_{t_3}^{t_4} i_T dt \right), \quad (2)$$

式中 V_{DD} 为两 MOSFET 的源极电压差值之绝对值, T 为信号周期, i_T 为漏极电流值, $t_1 \sim t_2$ 和 $t_3 \sim t_4$ 都为两管同时导通的时间段. 若使两管交替导通而避开同时导通, 则可降低瞬时导通功耗从而使 EMCCD 驱动总功耗大大降低.

对于普通的变压器, 当初级和次级线圈的匝数比为 $1:n$, 则输出信号 V_O 和输入信号 V_{IN} 的关系如式(3)所示:

$$V_O = nV_{IN}. \quad (3)$$

如图 1 所示, 对于自耦变压器, 当初级和次级线圈的匝数比为 $1:n$, 则输出信号 V_O 和输入信号 V_{IN} 的关系如式(4)所示:

$$V_O = (1+n)V_{IN}. \quad (4)$$

普通变压器只有磁能传递, 随着工作频率的加大损耗急剧上升, 不适合高频使用; 自耦变压器不仅有磁能传递, 还有电传导, 在体积相同的情况下能传输更多的能量; 在线圈匝数相同输入信号幅度的情况下, 能输出幅度更大的信号降低损耗, 特别适合在高频下的 EMCCD 驱动应用.

自耦变压器由于存在直流损耗和涡流损耗及存在分布参数, 其电路模型如图 2 所示; C_1 和 C_2 分别为初级线圈和次级线圈对地的分布电容; C_3 为初级线圈和次级线圈间的电容; C_4 为 CCD 驱动管脚的等效

电容; $-M$, L_1+M 和 L_2+M 分别为自耦变压器等效电路中包含的电感, R_1 , R_2 和 R_3 分别为自耦变压器等效电路中包含的直流电阻. 设工作角频率为 ω , 则当输出为 V_O 的情况下输入 V_{IN} 的值由式(5)决定.

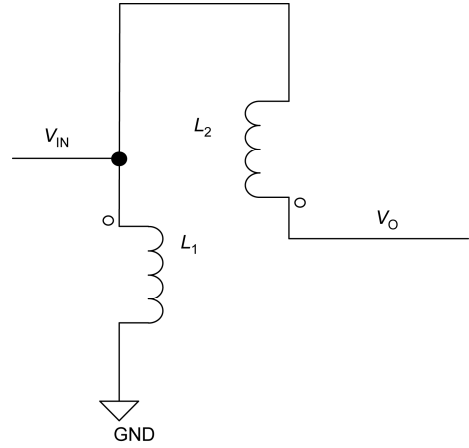


图 1 理想自耦变压器示意图

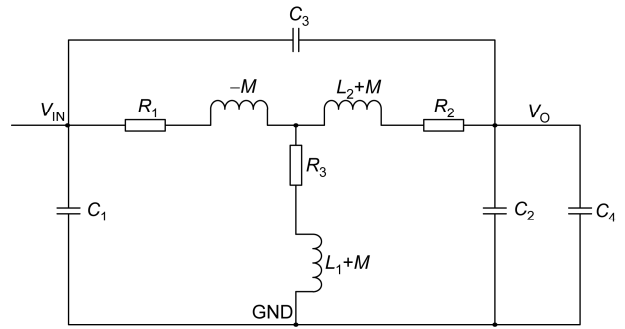


图 2 自耦变压器的实际模型电路图

$$V_O = V_{IN} \times \frac{\frac{R_2 + j\omega(L_2 + M)}{R_2 + j\omega L_2 + R_1 + \frac{(R_1 - j\omega M)[R_2 + j\omega(L_2 + M)]}{R_3 + j\omega(L_1 + M)}} - j\omega C_3 [R_2 + j\omega(L_2 + M)]}{j\omega(C_2 + C_3 + C_4)[R_2 + j\omega(L_2 + M)] + 1 - \frac{R_1 - j\omega M}{R_2 + j\omega L_2 + R_1 + \frac{(R_1 - j\omega M)[R_2 + j\omega(L_2 + M)]}{R_3 + j\omega(L_1 + M)}}}. \quad (5)$$

如式(5)所示, 输出不仅受输入信号的幅度和相位影响, 而且受负载电容、分布电容等分布影响; 在输出信号幅度固定的情况下, 降低分布电容 C_1 , C_2 和 C_3 的容值则可降低输入功率; 降低电阻 R_1 , R_2 和 R_3 的值也能进一步降低输入功率.

对于 RLC 串联谐振, 当电路处于谐振状态时, 输出信号 V_O 和输入信号 V_{IN} 的关系如式(6)所示:

$$V_O = \frac{V_{IN}}{R2\pi fC}, \quad (6)$$

式中 R 为电阻值, C 为负载电容的容值, f 为信号频率.

输出与输入信号的幅度成正比,若采用外部电感与 EMCCD 高压倍增时钟电极的集总参数电容谐振,则驱动功耗将大大降低.

对于模拟调压供电,其电源效率 η 如式(7)所示:

$$\eta = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (7)$$

电源效率与输入电压 V_{in} 和输出电压 V_{out} 差值相关,差值越大效率越低.若采样开关调压后再采用模拟调压,保证调压过程中模拟调压部分的输入和输出电压差值为较小的恒定值,则可提高电源效率,其电源效率 η 如式(8)所示:

$$\eta = \eta_{\text{kq}} \times \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (8)$$

由于开关调压方式电源效率 η_{kq} 高,输入电压 V_{in} 和输出电压 V_{out} 差值恒定,可在整个调压过程中保证较高的电源效率.为了克服开关调压纹波大的问题,采用了多级采样反馈的方法.

3 本小组实验研究进展

首先采用如图3所示的结构,解决了高速成像下的信号产生、驱动热量传导、自激振荡、数据整合及传输问题,实现了常规 CCD 1000 帧/s 的成像^[57],实验结果如图4所示,对 EMCCD 的超高速成像的相关问题进行了预先研究.然后针对 EMCCD 成像倍增增益调整的要求,对模拟线性电源和反激式 DC-DC 电

源进行了初步研究,其输入和输出关系曲线如图5所示,采用数字电位器实现了 EMCCD 驱动供电的数字化调整.最后针对两公司的 EMCCD 产品的电子倍增驱动进行了如下实验.

使用外部 51 pF 电容模拟 EMCCD 电子倍增时钟电极的集总参数电容,针对 E2V 公司的 EMCCD 产品的工作电平范围,分别采用传统图腾柱和改良图腾柱产生占空比 25% 频率 10 MHz 幅度 46.9 V 的矩形波,测试波形如图6所示,后者功耗为 7.2 W,比前者降低 10%.当尝试将改良图腾柱后接入电感组成低 Q 值的 LC 谐振电路时,输出频率 10 MHz 幅度 50 V 正弦波信号,测试波形如图7所示,电路功耗为 3 W,功耗相比图腾柱电路进一步降低.利用变压器升压,当输出频率为 10 MHz 幅度为 50 V 的正弦波,功率为 0.9 W;借助于变压器自耦态升压工作方式,当工作频率 20 MHz 输出幅度 50.6 V,功耗仅 0.78 W;与传统变压器升压相比,频率加倍时功耗降低 13%.针对 TI 公司的 EMCCD 产品的工作电平范围,当工作在变压器自耦态升压方式,输出如图8所示频率 33.3 MHz 低电平为 -4.34,高电平为 23.17 V 的正弦信号,功耗仅 0.25 W.

通过以上模拟实验,证明改良图腾柱、自耦态高频变压、集总参数电容串联谐振的驱动办法均可降低功率,特别是自耦态高频变压、集总参数电容串联谐振可工作在很高的工作频率下.但由于电子倍增

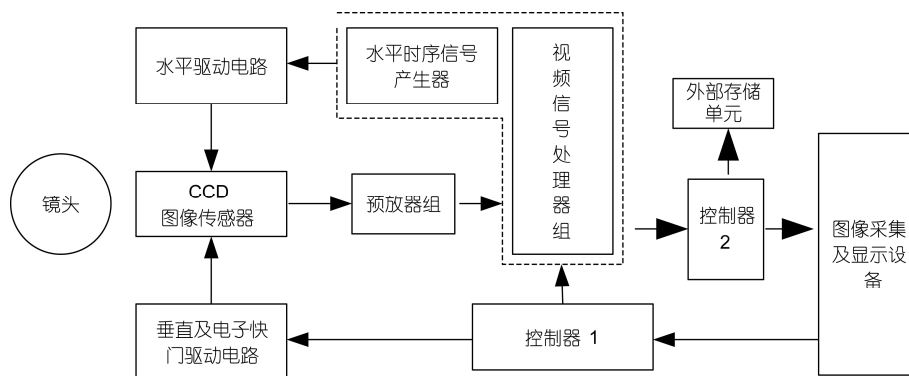


图3 高速相机系统结构图



图4 以帧频为 1000 帧/s 拍摄的节能灯关灯瞬间图像

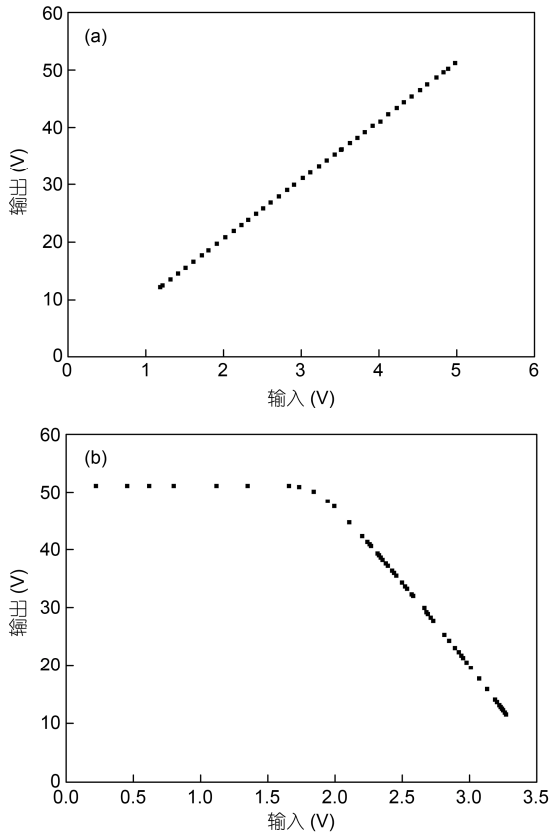


图5 模拟线性 and 数控开关电源输入和输出电压关系实测图
(a) 模拟线性输入和输出电压关系实测图; (b) 数控开关电源输入和输出电压关系实测图

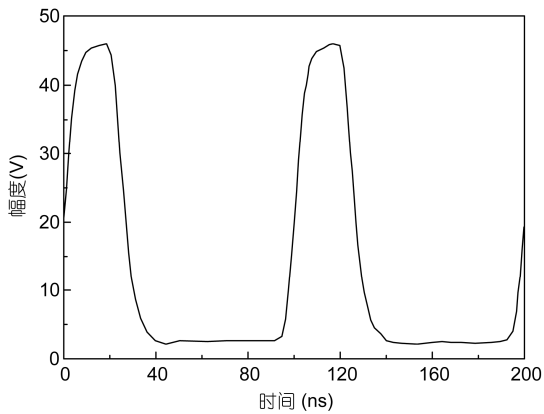


图6 实测的 MOSFET 推拉输出波形

时钟电极的集总参数电容随电路板级杂散参数、外界条件变化, 这会引起电路谐振频率变化从而使输出信号参数发生变化. 如表 1 所示, 两个驱动信号单独驱动 MOSFET 推拉驱动电路中的两管后接入电感组成低 Q 值的 LC 谐振电路时, 当采用不同的负载电容

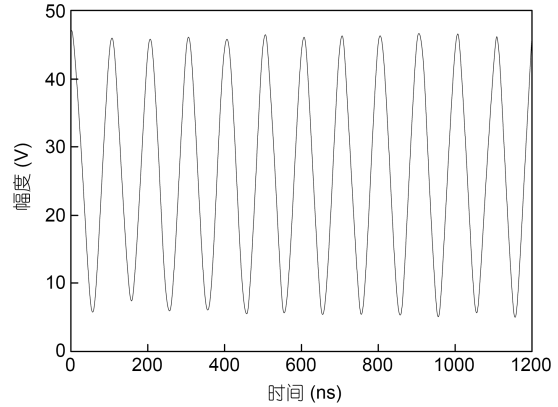


图7 实测的 MOSFET 推拉结合 LC 输出波形

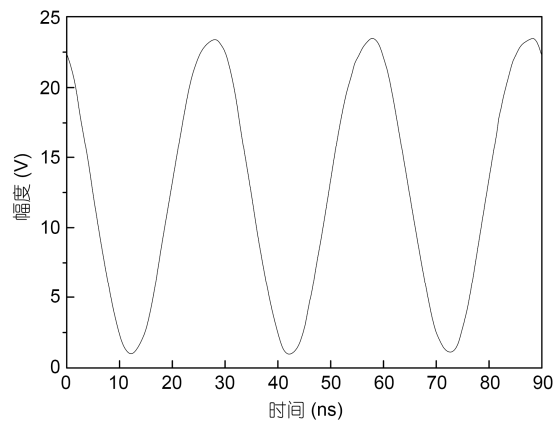


图8 实测自耦变压器升压输出波形

时, 输出的信号的相位和幅度都会发生改变. 由于采用外部输入同步信号方式, 工作频率不会改变, 因此对输出信号的相位和电平进行实时检测并调整也是下一步即将开展的工作.

4 总结

基于 EMCCD 的微光成像在航天应用中具有明显的优势和广泛的前景, 其器件的倍增机制决定了电子倍增驱动具有高速高压的特点, 随着对图像信息速率获取的要求逐步提高, 其超高速驱动是尚未完全解决的难题. 本文对国内外的成像研究进展情

表 1 输出信号相位和幅度随负载电容的变化

负载电容(pF)	输出与参考信号相位差值(ns)	信号幅度(V)
10	8.8	55
20	20.4	50
30	24.2	48
56	26.4	30

况进行了概述, 针对当前研究的不足, 提出了改良图腾柱、时钟电极集总参数电容的串联谐振、自耦态高频变压的驱动方法, 并经实验验证了其正确性, 得到了很好的应用结果, 为微光 EMCCD 超高速成像提供了新途径. 目前, 本小组正在针对成像速率的提升和功耗的降低兼顾可靠性和稳定性方面进行最优化研

究, 将建立具有确定初始态的宽范围精细调节高效 EMCCD 电压转换控制模型, 获得 EMCCD 高压倍增时钟电极的集总参数模型, 实现改良图腾柱、时钟电极集总参数电容的串联谐振、自耦态高频变压 3 种驱动方法的模型建立及优化, 最终实现最佳的航天 EMCCD 相机电子倍增驱动成像.

致谢 感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所郝志航、沈湘衡、韩广良、方伟研究员的指导, 感谢匿名审稿人认真严谨的审稿意见.

参考文献

- 王大勇. 低噪声微光图像采集系统的研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2012
- 陈小明. EMCCD 时序发生器及其驱动电路的研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学, 2012
- Leitner R, De B M, Arnold T, et al. Multi-spectral video endoscopy system for the detection of cancerous tissue. *Pattern Recognit Lett*, 2013, 34: 85–93
- Chao Y C. Fisher information and software support for single molecule microscopy image data analysis. Doctoral Dissertation. Dallas: University of Texas, 2010
- Fu G. Development of novel emission tomography system. Doctoral Dissertation. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2011
- Muraishi H, Abe S, Satoh H, et al. Fast data acquisition in heavy ion CT using intensifying screen-EMCCD camera system with beam intensity monitor. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2012, 59: 1934–1939
- Hall D J, Holland A, Soman M. The influence of electron multiplication and internal X-ray fluorescence on the performance of a scintillator-based gamma camera. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2012, 678: 64–77
- Tulloch S M, Dhillon V S. On the use of electron-multiplying CCDs for astronomical spectroscopy. *MNRAS*, 2011, 411: 211–225
- 王咏梅, 王英鉴, 王维和, 等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪. *科学通报*, 2009, 54: 3778–3783
- Sangalli L, Partamies N, Syrjasuo M, et al. Performance study of the new EMCCD-based all-sky cameras for auroral imaging. *Int J Remote Sens*, 2011, 32: 2987–3003
- Zhu B, Tan I C, Rasmussen J C, et al. Validating the sensitivity and performance of near-infrared fluorescence imaging and tomography devices using a novel solid phantom and measurement approach. *Technol Cancer Res Treat*, 2012, 11: 95–104
- Saurabh S, Maji S, Bruchez M P. Evaluation of sCMOS cameras for detection and localization of single Cy5 molecules. *Opt Express*, 2012, 20: 7338–7349
- Wu P H, Nelson N, Tseng Y, et al. A general method for improving spatial resolution by optimization of electron multiplication in CCD imaging. *Opt Express*, 2010, 18: 5199–5212
- Qu B, Huang Y, Wang W Y, et al. Image geometric corrections for a new EMCCD-based dual modular X-ray imager. In: IEEE, ed. *Proceedings of 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering-in-Medicine-and-Biology-Society*, 2011 Aug 30-Sep 03, Boston. New York: IEEE, 2011. 2634–2637
- Harpoe K B W, Andersen M I, Kjaegaard P. Bayesian photon counting with electron-multiplying charge coupled devices (EMCCDs). *Astron Astrophys*, 2012, 537: 1–11
- Jedrkwicz O, Blanchet J L, Lantz E, et al. Graphical thresholding procedure and optimal light level estimation for spatially resolved photon counting with EMCCDs. *Opt Commun*, 2012, 285: 218–224
- Chao J, Ward E S, Ober R J. Fisher information matrix for branching processes with application to electron-multiplying charge-coupled devices. *Multidimension Syst Signal Process*, 2012, 23: 349–379
- Heim G B, Burkpile J, Frame W W. Low-light-level EMCCD color camera. In: Henry D J, ed. *Proceedings of Conference on Airborne Intelligence Surveillance Reconnaissance (ISR) Systems and Applications III*, 2006 Apr 19–20, Kissimmee. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2006. 2090
- Kang M, Yang U, Sohn K. Spectral sensitivity estimation for EMCCD camera. *Electron Lett*, 2011, 47: 1369–1387
- Ramsey S A, Peak J, Setlik B. Technical assessment of low light color camera technology. In: Gilbreath G C, Hawley C T, eds. *Proceedings of Conference on Active and Passive Signatures*, 2010 Apr 08–09, Orlando. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2010. 1–18

- 21 王岱, 李其虎, 吴钦章. 针对 EMCCD 电路设计中的噪声特性分析. 电视技术, 2011, 35: 35–38
- 22 Qu B. High resolution solid state X-ray image intensifier (SSXII) using a modular array of the impactron EMCCD sensors. Doctoral Dissertation. Buffalo: State University of New York, 2010
- 23 Tulloch S. Astronomical spectroscopy with electron multiplying CCDs. Doctoral Dissertation. Sheffield: University of Sheffield, 2010
- 24 Ives D, Bezawada N, Dhillon V, et al. ULTRASPEC—An electron multiplication CCD camera for very low light level high speed astronomical spectrometry. In: Dorn D A, Holland A D, eds. Proceedings of Conference on High Energy Optical and Infrared Detectors for Astronomy III, 2008 Jun 23–26, Marseille. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2008. 1–11
- 25 Sharma P, Vasani S N S, Cartwright A N, et al. Two dimensional extensible array configuration for EMCCD-based solid state X-ray detectors. In: Pelc N J, Nishikawa R M, Whiting B R, eds. Proceedings of Conference on Medical Imaging-Physics of Medical Imaging, 2012 Feb 05–08, San Diego. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2012. 1–12
- 26 Gerralt A d V, Westra A H, Moody I, et al. Electronics for a photon-counting gamma camera based on an electron-multiplying CCD. In: Seibert J A, ed. Proceedings of Nuclear Science Symposium/Medical Imaging Conference, 2004 Oct 16–22, Rome. New York: IEEE, 2004. 4159–4163
- 27 Feautrier P, Gach J L, Balard P, et al. Characterization of OCam and CCD220, the fastest and most sensitive camera to date for AO wavefront sensing. In: Ellerbroek B L, Hart M, Hubin N, et al, eds. Proceedings of Conference on Adaptive Optics Systems II, 2010 Jun 27–Jul 02, San Diego. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2010. 1–14
- 28 Daigle O, Quirion P O, Lessard S. The darkest EMCCD ever. In: Holland A D, Dorn D A, eds. Proceedings of Conference on High Energy Optical and Infrared Detectors for Astronomy IV, 2010 Jun 27–30, San Diego. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2010. 1–11
- 29 Daigle O, Blais O S. Photon counting with an EMCCD. In: Bodegom E, Nguyen V, eds. Proceedings of Conference on Sensors Cameras and Systems for Industrial/Scientific Applications XI, 2010 Jan 19–21, San Jose. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2010. 1–10
- 30 Evagora A M, Murray N J, Holland A D, et al. Novel method for identifying the cause of inherent ageing in electron multiplying charge coupled devices. J Instrum, 2012, 7: 1–11
- 31 Smith D R, Walton D M, Ingley R, et al. EMCCDs for space applications. In: Dorn D A, Holland A D, eds. Proceedings of Conference on High Energy Optical and Infrared Detectors for Astronomy II, 2006 May 24–27, Orlando. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2006. 1–12
- 32 Hadwen B J, Camas M A, Robbins M S. The effects of Co-60 gamma radiation on electron multiplying charge-coupled devices. In: IEEE, ed. Proceedings of 7th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, 2003 Sep 15–19, Noordwijk. Noordwijk: Esa Publications Division C/O Estec, 2004. 2747–2752
- 33 Smith D R, Ingley R, Holland A D. Proton irradiation of EMCCDs. IEEE Trans Electron Devi, 2006, 53: 205–210
- 34 Ingley R, Smith D R, Holland A D. Life testing of EMCCD gain characteristics. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sec A, 2009, 600: 460–465
- 35 卜洪波, 陈瑞明, 张玉贵, 等. 一种星载相机 EMCCD 高压驱动电路设计. 航天器工程, 2012, 6: 48–53
- 36 Rowland D E, Collier M R, Sigwarth J B, et al. Science of opportunity heliophysics on the FASTSAT mission and STP-S26. In: IEEE, ed. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2011 Mar 05–12, Big Sky. New York: IEEE, 2011. 1–12
- 37 Haino S. Performance of the AMS-02 silicon tracker in the ISS mission. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 2013, 699: 221–224
- 38 Monfardini A, Trampus P, Battiston R, et al. AMICA, an astro-mapper for AMS. Astropart Phys, 2006, 25: 355–360
- 39 Kounine A. AMS Experiment on the international space station. In: Steadman S G, Stephens G S F, Taylor F E, eds. Proceedings of 19th Particles and Nuclei International Conference, 2011 Jul 24–29, Massachusetts Inst Technol. Melville: Amer Inst Physics, 2012. 63–70
- 40 Westergaard N J, Madsen K K, Brejnholt N F, et al. NuSTAR on-ground calibration I: Imaging quality. In: Takahashi T, Murray S S, DenHerder J W A, eds. Proceedings of Conference on Space Telescopes and Instrumentation 2012-Ultraviolet to Gamma Ray, 2012 01–06, Amsterdam. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2012. 1–8
- 41 Turon C, Luri X, Masana E. Building the cosmic distance scale: From Hipparcos to Gaia. Astrophys Space Sci, 2012, 341: 15–29
- 42 金文敬. 第二个天体测量卫星(Gaia)项目的进展. 天文学进展, 2011, 29: 191–206
- 43 骆乐. EMCCD 噪声特性分析与测试技术研究. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2010. 1–14
- 44 王明富, 杨世洪, 吴钦章, 等. 电子倍增器件 CCD60 噪声特性分析. 光电工程, 2011, 38: 145–150
- 45 王明富, 杨世洪, 吴钦章, 等. 一种高帧频 EMCCD 驱动电路设计. 光电工程, 2011, 38: 135–140
- 46 张艳艳, 饶长辉, 李梅, 等. 基于电子倍增电荷耦合器件的哈特曼-夏克波前传感器质心探测误差分析. 物理学报, 2010, 59: 5905–5914
- 47 谢宗宝, 张涛, 张晶晶. 空间 EMCCD 成像系统中倍增高压时钟驱动设计. 科学技术与工程, 2011, 11: 3946–3950
- 48 陈苏广, 张涛, 郑伟波, 等. 幅值可调的 EMCCD 倍增时钟驱动电路设计. 光电工程, 2012, 4: 145–150
- 49 谢宗宝, 张涛. EMCCD 用于空间生物光成像探测的可行性分析. 光电工程, 2010, 37: 85–90
- 50 金建辉, 李彬华, 陈小明. EMCCD 电荷倍增驱动电路分析与 PCB 设计. 天文研究与技术, 2012, 9: 316–322
- 51 陈小明, 李彬华. EMCCD 时序发生器的 VHDL 设计. 计算机工程与应用, 2012, 48: 72–75
- 52 卜洪波, 陈瑞明, 张玉贵, 等. 基于电子倍增 CCD 的微光成像传感器焦面电路设计. 航天返回与遥感, 2012, 33: 47–54

- 53 孙静, 张保平, 曹睿学. 基于 EMCCD 的驱动电路设计. 现代电子技术, 2011, 34: 150–154
54 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 电子倍增 CCD 星相机的设计. 光学精密工程, 2010, 18: 1396–1403
55 余达, 陈佳豫, 文大化, 等. 一种 EMCCD 特有信号的驱动系统. 中国专利, CN102158661A, 2011-08-17
56 余达, 周怀得, 李广泽, 等. 一种实现 EMCCD 特有驱动信号的系统. 中国专利, CN102158658A, 2011-08-17
57 余达, 郭永飞, 周怀得, 等. 面阵 CCD KAI-0340M 高速相机的设计. 光学精密工程, 2011, 19: 2791–2799
-

Recent progress in low light level superspeed EMCCD imaging

YU Da¹, LIU JinGuo¹, GUO YongFei¹, ZHOU HuaiDe¹, LI Jie², LI MingJing² & CHEN JiaYu¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

² College of Electronic Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China

Low light level imaging based on Electronic Multiplying CCD (EMCCD) is the focus of today's aerospace research, just as its obvious advantages and broad application prospects. The EMCCD's multiplying mechanism gives electronic multiplying driving high-speed and high-voltage characters. However, with the increasing demand for high speed image acquisition, the requirement of driving speed become higher, the superspeed driving mechanism become scientific problems that are not completely solved yet. The recent developments of the EMCCD imaging have been reviewed in this paper and new methods based on improved totem pole, EMCCD high voltage multiplying electrode's lumped parameters lumped capacitance series resonance, high frequency voltage autotransformation, and voltage transformation control model of EMCCD were proposed for the shortcomings of reported methods. Finally, the new experimental results have been reported and the future research prospects have been proposed.

electronic multiplying, high frequency voltage autotransformation, lumped capacitance series resonance, voltage transformation

doi: 10.1360/972013-430