

一种面阵 CCD 的筛选测试方法

余 达 周怀得 龙科慧 徐 东 刘金国*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为从工业级面阵 CCD 芯片中筛选出满足航天高可靠性和稳定性应用要求的器件, 提出了一种面阵 CCD 的板级筛选测试方法, 设计了相应筛选测试系统。采用老炼前测试参数、老炼过程中检测感光性能、老炼后测试参数及同批次器件抽样进行长寿命实验的四重筛选过程剔除不合格器件; 通过测试 CCD 组成的相机来进行其参数的判定, 利用暗室环境下的积分球、导轨等进行亮场和暗场参数测试, 提出利用积分球、靶标、平行光管和六自由度调整系统进行调制传递函数最大值的自动测试。筛选测试后的器件已经应用于工程实践, 并通过了一系列实验考核, 结果表明, 采用此方法筛选出的面阵 CCD 芯片满足航天应用要求。

关键词 探测器; 面阵 CCD; 航天; 高可靠性和稳定性; 板级筛选测试; 调制传递函数

中图分类号 TN386.5; P231 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0708001

Screening and Testing Method for Area CCD

Yu Da Zhou Huaide Long Kehui Xu Dong Liu Jinguo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to screen high reliability and stability area CCD from industrial class devices for the aerospace application, a board level screening and test method for area CCD is put forward and a corresponding screening and test system is designed. To find out unqualified devices, four steps are carried out, consisting of parameters test before aging process, photosensitive property test during the aging process, parameters test after aging process and long-life experiment for the same batch sampling devices; the judgment of area CCD parameters is made via testing the camera which contains the area CCD; the integrating sphere and guideway are used to test the the bright field and dark field parameters in the darkroom environment. The integrating sphere, the target, the collimator and the six degrees of freedom adjusting system are used to modulation transfer function (MTF) maximum value test. The screening and test of area CCD have been used in engineering practice and passed through a series of test evaluation. The test evaluation results show that the screening and test meet the aerospace applications requirements.

Key words detectors; area CCD; aerospace; high reliability and stability; board-level screening test; modulation transfer function

OCIS codes 040.1520; 120.0280; 110.2970

1 引 言

电荷耦合器件(CCD)诞生于 20 世纪 70 年代^[1], 具有信号输出噪声低、动态范围大、量子效率高以及电荷转移效率高等优点^[2~7], 被广泛地使用在天文、遥感等诸多领域。根据其结构, CCD 分为线阵和面阵 CCD 两类。随着制作工艺和相关电路的不断完善,

CCD 相机开始向全固体化、小型化、自动化的方向发展^[8]。自 2000 年以后全球对 CCD 相机的总需求量逐渐递增, 军事上以航空相机和航天相机为主。航空航天相机成为最主要的战况信息来源工具, 拥有全方位、全天候、多方式的航空航天相机方能掌握战争发展的走势^[9,10]。面阵图像传感器比线阵图像传

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61108066)和吉林省自然科学基金面上项目(201215107)资助课题。

作者简介: 余 达(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事 CCD 相机成像电路应用技术等方面的研究。

E-mail: ciompyuda@163.com

* 通信联系人。E-mail: liujg @ciomp.ac.cn

传感器更具优势,在曝光瞬间就能获得整幅图像信息,且生成的每幅图像都符合中心投影规律,在未来的航空航天相机中将得到更广泛的应用。

由于高等级器件采购困难,为满足航空特别是航天环境下的应用要求,可对工业级塑封器件进行升级筛选,剔除具有缺陷或潜在缺陷的器件^[11],确保较高的可靠性^[12]。目前国际上已经有多个项目应用了商用塑封器件^[13];国内也逐步开始了商用器件空间应用的探索。中国科学院空间科学与应用研究中心在载人航天工程和双星计划等航天任务中曾采用了几种商用器件,并取得了在轨飞行的成功经验^[14]。塑封面阵 CCD 在可靠性上存在很大差别,因此不能直接在环境条件严酷的航天领域使用,必须进行鉴定试验^[15];由于面阵 CCD 器件必须在外部的偏置电压和驱动信号下才能正常工作进行鉴定试验,因此面阵 CCD 筛选测试更有效的方法是以面阵 CCD 为核心搭建相机并与外部的测试设备组成筛选测试系统,通过测试相机的指标来间接测试

CCD 性能,除破坏性物理分析(DPA)和外观检查外,都需要进行板级的性能测试。

2 筛选面阵 CCD 的相机设计

由于面阵 CCD 必须在外部特定的偏置电压和满足特定时序关系的驱动信号下才能正常工作,进而才能测试其性能参数,设计的筛选测试用面阵 CCD 相机电路框图如图 1 所示,计算机(PC)作为总控制器,通过串行总线向内部控制器发送相机开机、关机及各种工作参数命令;内部控制器根据接收到的相关工作参数后,产生对应的水平和垂直转移时序信号,分别经水平和垂直驱动电路后输出满足面阵 CCD 工作需要的信号;面阵 CCD 输出的模拟信号经预放大器后经视频处理器进行可变增益放大、相关双采样和模数转换后输出数字图像信号,经接口电路进行电平和输出格式转换后经计算机的采集卡获得图像。

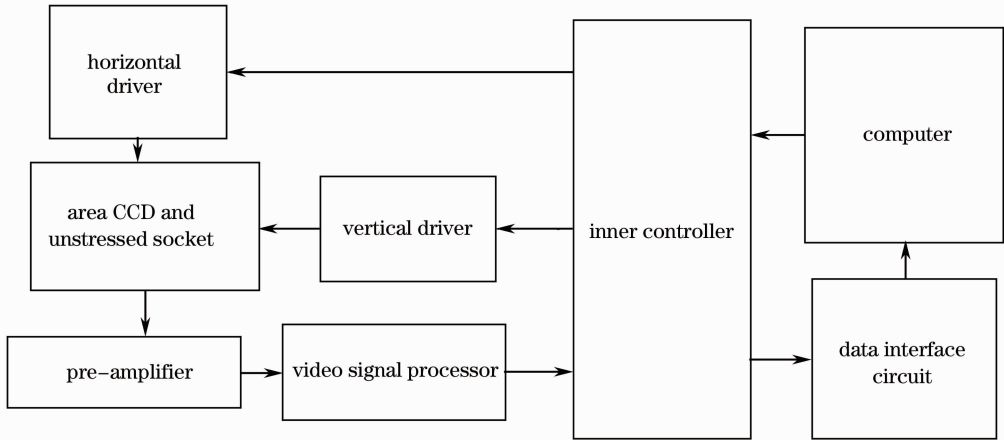


图 1 面阵 CCD 相机电路框图

Fig. 1 Diagram of area CCD camera

由于多数面阵 CCD 管脚较软,多次插拔可能影响器件管脚的力学性能,故采用带夹具功能的无应力插座来进行 CCD 与电路板的桥接。由于老炼实验是针对面阵 CCD 芯片而非整机,测试面阵 CCD 参数时连接线过长会影响测试结果,故在老炼时仅把面阵 CCD 和无应力插座放入温箱,无应力插座和相机的电路板通过较长高温延长线连接在一起。测试器件参数时使用插针短距离连接。

3 面阵 CCD 的筛选测试方法

面阵 CCD 的筛选测试分四个步骤进行:1)老炼前进行面阵 CCD 的亮场、暗场和调制传递函数

(MTF)参数测试,剔除参数差的器件;2)老炼 240 h,在此阶段每 12 h 检测一次 CCD 感光情况,并作为工作是否正常的依据;3)老炼 240 h 后保证与老炼前相同的温度、湿度等外部环境下再次进行参数测试,剔除老炼前后参数变化超过 5% 的器件;4)若以上条件满足要求,再从每批芯片中抽取一片进行 1000 h 的长寿命实验,在此阶段每 12 h 测试一次 CCD 感光情况,并作为工作是否正常的依据;只有通过全部测试的器件才判定为筛选合格的器件,具体流程如图 2 所示。所有测试项目都基于对图像的分析进行,在特定的条件下使用相机成像,然后利用软件对图像进行分析,得到最终的测试结果。

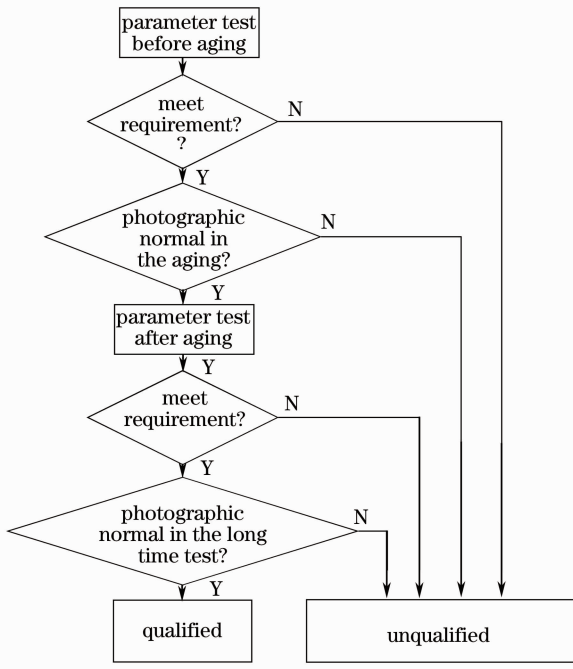


图 2 面阵 CCD 筛选测试流程

Fig. 2 Flow chart of area CCD screening and testing

3.1 亮场和暗场参数测试

亮场和暗场参数测试框图如图 3 所示,由于相机从积分球得到的光能量不仅与积分球内开灯的数量相关,也与积分球出口的距离相关,可通过改变积分球内开灯的数量、相机与积分球的距离来改变入射光能量,记录在当前采集到的灰度值时对应的积分球内开灯数量和相机与积分球的距离,然后测试出对应的光能量。关闭所有的积分球内的灯即为暗场测试。

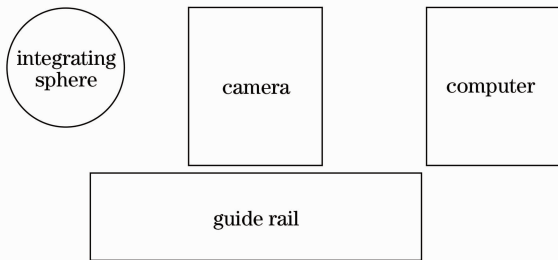


图 3 亮场和暗场参数测试框图

Fig. 3 Diagram of bright field and dark field parameter test

面阵相机需要测量整幅图像才能计算出光子响应不一致性 (PRNU)。在单通道模式、相机频率为 30 frame/s 下测量,获取以下三种情况:

- 1) 50% 饱和光强时,图像的标准偏差值 S_{TDDEV} ;
- 2) 100% 饱和光强时,图像的平均数值 M_{can} ;

3) 暗场图像的偏移值 $D_{arkoffset}$ 。

那么光子响应不一致性 $P_{RNU(rms)}$ 可以表达为

$$P_{RNU(rms)} = \frac{S_{TDDEV}}{M_{can} - D_{arkoffset}} \times 100\%, \quad (1)$$

标准偏差 δ_x 可表示为

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

固定模式噪声 (FPN) 定义为暗场环境下,感光区图像的最大值与最小值之间的差值。计算固定模式噪声 F_{PN} 时应该去除随机噪声的影响。在单通道模式下,相机频率为 30 frame/s 下测量,随机抓取两幅暗场图像,计算 F_{PN} 得

$$F_{PN(rms)inDN} = \sqrt{S_{TDDEV}^2 - N_{OISE(rms)}^2}, \quad (3)$$

式中下标 DN 为从相机获得数字灰度值, $N_{OISE(rms)}$ 为图像数据的均方根 (RMS) 噪声。

直流偏移是指在暗场环境下,感光区图像数据输出时相对于 DN 值为 0 的平均输出 DN 值。

随机噪声又称均方根噪声,是指暗场环境下两幅图像之间的差别。在暗场环境单通道模式下,放置相机频率为 30 frame/s 时,随机抓取两幅图像,计算随机噪声为

$$N_{OISE(rms)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times [S_{TDDEV} (i_{image1} - i_{image2})], \quad (4)$$

式中 i_{image1} 和 i_{image2} 为暗场中连续拍摄时相邻两幅图像的整帧像元的灰度值。

响应度是指输入曝光量产生的对应的输出幅值。由于 CCD 存在死区和非线性饱和效应^[16],取 20% 和 80% 两点。测量在单通道模式,相机频率为 30 frame/s 时,当光源调节至 20% 饱和光强,用功率计测量光功率 I_1 ,计算输出图像与暗场输出图像之间的差值 D_1 ;当光源调节至 80% 饱和光强,用功率计测量光功率 I_2 ,计算输出图像与暗场图像之间的差值 D_2 。

则响应度 R 表示为

$$R = \frac{D_2 - D_1}{I_2 - I_1}, \quad (5)$$

其动态范围 D_R 表达为

$$D_R = \frac{S_{AT}}{N_{OISE(rms)}}, \quad (6)$$

式中 S_{AT} 为 CCD 饱和曝光量。

3.2 MTF 参数测试

通常情况下正弦靶标制作难度大、费用高,所以不直接测量 MTF^[17],而是通过方波靶标测量对比度传递函数 (CTF),通过公式计算间接测量 MTF。

具体电路如图 4 所示,积分球作为平行光源,照射靶标并经平行光管和透镜后成像在 CCD 的焦面上。CCD 输出的图像经采集卡输入到计算机中,经 MTF 计算软件即可实时测试出当前的 MTF 值。由于面阵 CCD 的 MTF 受焦面 CCD 各方位的影响,故需仔细调整才能测试得到最大的 MTF 值。提出采用六自由度自动调整系统来进行六个方位的调整,具体步骤为:1)通过改变 x 位置的值测试 MTF 确定最佳的 x 位置;2)在最佳 x 位置的情况下通过改变 y 位

置的值测试 MTF 确定最佳的 y 位置;3)在最佳 x 和 y 位置的情况下通过改变 z 位置的值测试 MTF 确定最佳的 z 位置;4)在最佳 x 、 y 和 z 位置的情况下通过改变 x 的旋转位置 B_x 的值测试 MTF 确定最佳的 B_x ;5)在最佳 x 、 y 、 z 和 B_x 位置的情况下通过改变 y 的旋转位置 B_y 的值测试 MTF 确定最佳的 B_y ;6)在最佳 x 、 y 、 z 、 B_x 和 B_y 位置的情况下通过改变 z 的旋转位置 B_z 的值测试 MTF 确定最佳的 B_z 。在最佳的六方位情况下再进行最大 MTF 值的测试。

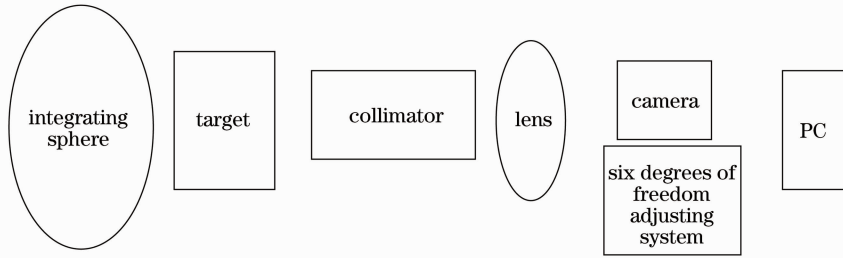


图 4 MTF 测试框图

Fig. 4 Diagram of MTF test

4 实验结果

搭建了筛选测试用面阵 CCD 相机电路,经测试,各偏置和驱动信号满足工作要求。图 5 为实测的水平驱动信号,图 6 为 CCD 输出的模拟信号。按照老炼前测试参数、老炼过程中检测感光性能、老炼后测试参数及同批器件抽样进行长寿命实验的四重筛选过程,经过 240 h 的老炼后,同一芯片老炼前后参数变化低于 5%,同批次的抽样器件 1000 h 长寿命试验感光正常,从 20 片工业级面阵 CCD 芯片筛选出 5 片,筛选后的器件已经应用于工程实践,并通过了一系列试验考核。一面阵 CCD 芯片在老炼后的测试为:信噪比(SNR)为 42.4,PRNU 为 0.49%,

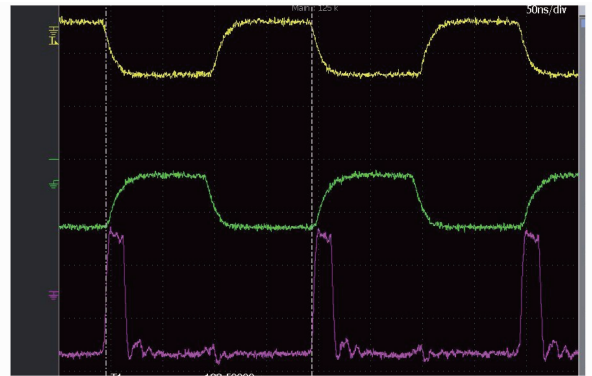


图 5 水平驱动信号实测图

Fig. 5 Real waveform of horizontal driving signals



图 6 实测模拟 CCD 信号图

Fig. 6 Real waveform of analog CCD signal

随机噪声为 0.778442, 动态范围为 62.1, 固定图形噪声为 6.8, 直流偏置为 46, 焦面 MTF 为 0.580。图 7 为响应度拟合直线; 图 8 为 MTF 测试过程中的靶标实际成像图。

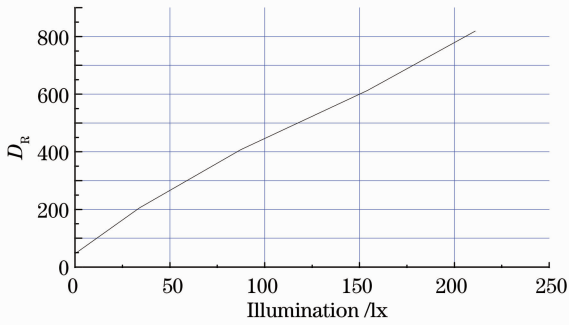


图 7 响应度拟合直线

Fig. 7 Response fitting line

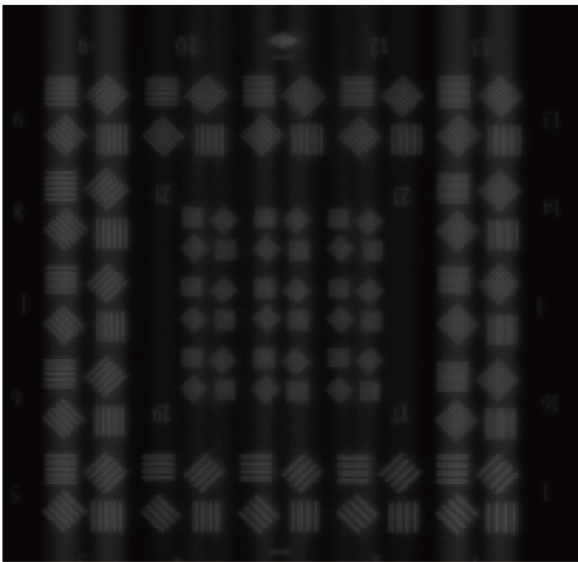


图 8 靶标实际成像图

Fig. 8 Real image of target

5 结 论

为从普通的工业级面阵 CCD 芯片中筛选出满足航天高可靠性和高稳定性应用要求的器件, 提出了一种面阵 CCD 的板级筛选测试方法, 设计了相应筛选测试系统, 通过判定筛选测试系统的性能来对器件的性能进行判定。采用老炼前测试参数、240 h 老炼过程中检测感光性能、老炼后测试参数与老炼前对比不能超过 5% 及同批器件抽样进行 1000 h 长寿命实验检测感光性能的四重筛选过程剔除不合格器件; 老炼实验和长寿命过程中将器件单独放置在老炼设备中经耐高温的延长线与线路板相连; 通过测试 CCD 组成的相机来进行其参数的判定, 利用暗

室环境下的积分球、导轨等进行亮场和暗场参数测试, 通过改变积分球的内开灯数量和相机与积分球的距离来改变入射光能量; 提出利用积分球、靶标、平行光管和六自由度调整系统进行调制传递函数最大值的自动测试, 通过六个自由度最佳位置的逐个调整来得到最大的 MTF 值。筛选测试后的器件已经应用于工程实践, 并通过了一系列实验考核, 结果表明, 设计的筛选测试系统能使器件工作正常, 采用此方法筛选出的面阵 CCD 芯片满足航天应用要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Qingyou. Image Sensor Applications Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
王庆有. 图像传感器应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- 2 Liu Jinguo, Yu Da, Zhou Huaide, *et al.*. Study of high speed driver system for area-CCD KAI-1010M [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1622-1628.
刘金国, 余 达, 周怀得, 等. 面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的高速驱动系统设计 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(9): 1622-1628.
- 3 Yu Da, Zhou Huaide, Li Guangze, *et al.*. TDI three-line pattern based on area-CCD KAI-1010M [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2980-2984.
余 达, 周怀得, 李广泽, 等. 基于面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的 TDI 三线阵工作方式研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2980-2984.
- 4 Yu Da, Guo Yongfei, Zhou Huaide, *et al.*. Design of high speed camera system for area-CCD KAI-0340DM [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2791-2799.
余 达, 郭永飞, 周怀得, 等. 面阵 CCD KAI-0340DM 的高速相机系统设计 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11): 2791-2799.
- 5 Liu Jinguo, Yu Da. Design of a high-speed CCD camera for laser applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100301.
刘金国, 余 达. 基于激光应用的高速相机设计 [J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100301.
- 6 Zhou Huaide, Liu Haiying, Xu Dong, *et al.*. Study of TDI pattern for interline transfer progressive scan CCD [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1629-1634.
周怀得, 刘海英, 徐 东, 等. 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式研究 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(9): 1629-1634.
- 7 Sheng Cuixia, Zhang Tao, Ji Jing, *et al.*. Design of CCD FTF4052M driver system with high sensitivity [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(4): 564-569.
盛翠霞, 张 涛, 纪 晶, 等. 高分辨率 CCD 芯片 FTF4052M 的驱动系统设计 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(4): 564-569.
- 8 Cai Wengui. CCD Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994.
蔡文贵. CCD 技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- 9 Lin Jiaming, Yang Longrong. Development tendency and application prospects of CCD camera technique [J]. Optical Technique, 1999, (6): 43-47.
林家明, 杨隆荣. CCD 摄像机技术的发展趋势及应用前景 [J]. 光学技术, 1999, (6): 43-47.
- 10 Zhang Yu. Research on the Image Collection and Image Processing System Based on the Wide Visual Field Large Area CCD Camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
张 宇. 宽视场面阵 CCD 相机图像采集与处理系统研究 [D].

- 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- 11 Hu Shanwei, Lei Wanxing, Liu Zhe, *et al.*. Plastic components for military research industrial file [J]. *Electronic Component & Device Applications*, 2009, 11(10): 93-95.
胡善伟, 雷婉星, 刘 喆, 等. 工业档塑封元器件的军用研究 [J]. *电子元器件应用*, 2009, 11(10): 93-95.
 - 12 Ding Jishan. Domestic semiconductor device reliability screening technique [J]. *Semiconductor Technology*, 1999, 24(3): 55-57.
丁继善. 国内半导体器件的可靠性筛选技术 [J]. *半导体技术*, 1999, 24(3): 55-57.
 - 13 Alexander Teverovsky. Plastic Encapsulated Microcircuits (PEMs) [OL]. <http://eed.gsfc.nasa.gov/562/pems/pems.htm>, [2013-04-01].
 - 14 Jiang Xiujie, Sun Huixian, Wang Zhihua, *et al.*. Technical overview of the electronic components selection for spacecraf [J]. *Chinese J Electron Devices*, 2005, 28(1): 38-43.
姜秀杰, 孙辉先, 王志华, 等. 航天电子系统中电子元器件选用的途径分析 [J]. *电子器件*, 2005, 28(1): 38-43.
 - 15 Zhu Hengjing. Board-level identification of aerospace uses high-performance plastic devices [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(1): 87-90.
朱恒静. 航天器用高性能塑封器件的板级鉴定方法 [J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(1): 87-90.
 - 16 Zhao Man, Jiang Bo, Fan Xiuying, *et al.*. Measurement and analysis on the modulation transfer function of CCD camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 071201.
赵 曼, 姜 博, 范秀英, 等. CCD 相机调制传递函数的测试分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 071201.
 - 17 He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD' nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0408001.
贺元兴, 李新阳. CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量的影响 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0408001.

栏目编辑: 何卓铭