

# CCD 固体成像器件性能测试方法的研究

尚媛园<sup>1,2</sup> 关 永<sup>1</sup> 张伟功<sup>1</sup> 赵晓旭<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 首都师范大学信息工程学院, 北京 100048; <sup>2</sup> 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

**摘要** CCD 图像传感器是目前科学成像领域主流的固体成像器件。一般而言, 当成像系统中使用 CCD 器件时, 首先需要测量它的一些性能指标, 这是判断该 CCD 器件是否满足整个系统性能要求的重要依据。对 CCD 成像器件性能的测试方法进行了探讨, 涉及的参数包括增益、噪声、电荷转移效率、线性和满阱电荷等。研究重点是如何应用扩展像素边界反应方法及同位素 X 射线方法检测 CCD 的电荷转移效率, 以及利用 X 射线方法测量器件的增益。最后以理论研究为基础, 发展并提出了一套切实可行的 CCD 器件检测方法, 同时基于 E2V 公司 4K×4K 芯片 CCD203\_82 进行了性能测试实验, 实验结果也验证了本文提出的测试方法的可行性和可靠性。

**关键词** 图像传感器; 测试; CCD; 读出噪声; 电荷转移效率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0317

## Research on Evaluation Method of CCD Image Sensor

Shang Yuanyuan<sup>1,2</sup> Guan Yong<sup>1</sup> Zhang Weigong<sup>1</sup> Zhao Xiaoxu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China )  
(<sup>2</sup> National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China )

**Abstract** CCD image sensor plays an important role as major solid-state array in scientific imaging application for its excellent performance. Generally speaking, some important parameters of CCD imager, such as transfer efficiency, readout noise and so on, should be firstly measured to estimate whether the imager can satisfy the performance requirements of whole system, especially in the scientific application. So it is very important to make research on the evaluation method of CCD imager. The paper introduces evaluation method of some important CCD parameter, including gain, readout noise, charge transfer efficiency, linearity, and well capacity. The methods to measure charge transfer efficiency by Fe<sup>55</sup> X-ray source and extended pixel edge reaction are mainly discussed. Several ways to evaluate CCD gain are also analyzed in detail. A platform to evaluate CCD imager in the laboratory is developed and measurement tests of E2V CCD203\_82 are also carried out using this method. The experiments show that the evaluation method we developed is feasible, flexible, and reliable.

**Key words** image sensor; evaluation; CCD; readout noise; charge transfer efficiency

## 1 引 言

固体成像器件是在半导体材料(通常是 Si)上面集成一维或者二维的光敏元件阵列, 通过光电效应, 将所拍到的光信号转换成模拟电信号(电压或者电流), 再经过模数转换, 转成数字信号并存储的器件<sup>[1]</sup>。CCD 是现在主流的固体成像器件, 它是由众多微小的光敏单元、电荷转移电路(读出移位寄存器)和电荷信息读取电路组成。CCD 光敏单元通过光电效应收集电荷, 这些电荷在同步时钟控制下被送到移位寄存器上, 然后串行读出并通过电荷信息

读取电路转换为电压<sup>[2]</sup>。CCD 固体成像器件自 1970 年问世以来性能取得了巨大进步, 现在其性能指标已经非常的优秀, 表现为低的读出噪声、高的电荷转移效率和极高的量子效率等。CCD 成像器件由于其本身卓越的性能使得它现在广泛应用于工业、军事国防、科学成像等诸多领域。

当 CCD 成像器件用于一些科学成像领域诸如天文观测时, 整个成像系统对 CCD 的一些性能指标要求极其严格, 需要极低的噪声和较高的电荷转移效率、线性和满阱电荷等, 所以需要获取 CCD 器件

一些重要性能,以此判断该 CCD 器件是否满足整个系统的性能要求<sup>[3]</sup>。但在实际应用中,由生产厂家提供的 CCD 检测指标通常是以电视广播工业标准为标准的,即使是科学级芯片,也经常缺乏天文或其它科学实际应用所要求的指标。同时,在进行科学成像系统的设计前,必须对所用 CCD 器件的关键指标进行测试。为此,以科学应用为目标,研究 CCD 成像器件的性能测试方法,为广大科研工作者提供一套行之有效的测试手段,具有十分重要的意义。

## 2 CCD 成像器件性能测试方法研究

对于科学成像应用来说,量子效率、电荷转移效率、噪声、线性和满阱电荷通常是 CCD 最重要的特性指标。由于 CCD 器件的量子效率主要取决于半导体材料,芯片厂家一般可以提供准确的数据,所以本文主要对其它特性的测试方法进行研究。重点研究如何应用扩展像素边界反应方法及放射性元素  $\text{Fe}^{55}$  两种方法检测转移效率,以及如何利用放射性元素  $\text{Fe}^{55}$  测量增益。

### 2.1 增益

CCD 成像器件的原始输出为电子,通过模数转换后被读出。增益定义为一个数字单位 (ADU) 对应的光生电子数。CCD 器件的增益是一个很重要的指标,其它性能的评估大都以它为基础。通常采用的增益测量的方法是光子转移技术。该方法基于以下原理: CCD 器件输出的总噪声分解为读出噪声和信号噪声两部分,二者以平方和关系构成了器件读出的总噪声的平方,并且一般认为信号噪声服从泊松统计分布,与 CCD 输出信号的平方根成正比<sup>[1]</sup>。则增益  $G$  可由下式得到

$$G = \frac{S}{\delta_N^2 - \delta_R^2}, \quad (1)$$

式中  $S$ 、 $\delta_N$  和  $\delta_R$  分别为输出信号、总噪声和读出噪声,  $S$  值应扣除图像本底,单位均为 ADU。可以通过光子转移曲线计算增益,光子转移曲线是代表 CCD 在不同强度的均匀光信号下的响应曲线。它的横坐标为某区域的平均光强信号,纵坐标为该区域的方差,即噪声的平方。然后对曲线线性段的部分进行直线拟合,该条直线斜率的倒数就是 CCD 的增益。实际上,用光子转移曲线可以同时获得读出噪声的值,拟合后的直线在方差轴上的截距就是以 ADU 为单位的读出噪声的平方。根据增益的物理意义,将 ADU 为单位的读出噪声乘以增益就得到了以电子为单位的读出噪声的值。

国家天文台探测器实验室通常使用光子转移技术方法来测试增益,但是在实际使用时,发现该方法稳定性较差,光源和像元的不均匀容易造成较大的系统误差。为此,本文研究了更为精确和稳定的同位素 X 射线增益测试方法。

#### 2.1.1 同位素 X 射线方法测试 CCD 增益

除光子转移技术方法外,也可通过同位素 X 射线方法测试 CCD 器件的增益。由于可见光或近红外光的光子能量较小,它们与硅的相互作用只产生一个电子空穴对,而利用特殊波长的同位素 X 射线可以产生更多的已知数量的光生电子,从而可以得到增益的值。

$\text{Fe}^{55}$  是目前使用最为广泛的同位素。 $\text{Fe}^{55}$  发射线的光子具有很好的单色性,单个光子能量为 5.9 keV ( $\text{Fe}^{55}$  的 Mn K $\alpha$  线,是它最强的发射线,波长为 0.21 nm)。一个能量为  $E$  的光子与硅相互作用产生的电子空穴对的数目为  $E/3.65$  ( $E$  的单位是 eV), 所以  $\text{Fe}^{55}$  X 射线的光子在硅半导体中将产生 1620 个电子空穴对 (对  $\text{Fe}^{55}$  的 Mn K $\alpha$  线,这个数值为 1616.44  $e^-$ , 通常近似为 1620  $e^-$ )。当 X 射线光子的吸收区域正好在一个像元之内,产生的电子只为一个像元所收集时,则将在该像元上产生 1620 个电子,这也称为单像元 X 射线事件<sup>[1]</sup>。

用 X 射线的方法,可以获得一幅 X 射线事件的 CCD 图像,然后统计图像中的单像元 X 射线事件的平均读出值  $M$  (ADU),它在单个像元上产生的电子是已知的 (1620  $e^-$ ),用这个已知的数值除以平均读出值  $M$  即可获得 CCD 器件的增益。

### 2.2 电荷转移效率的检测

CCD 器件在读出过程中,通过顺序改变相邻栅极的电压从而在信号通道内产生栅极间的电势耦合,代表信号大小的电荷包也随之从一个像元转移到下一个像元。而在行转移或者列转移的过程中,不可避免地会产生电荷损失。CCD 的电荷转移效率 (CTE) 就是用来表征器件在电荷转移过程中电荷损失大小的指标。它定义为 CCD 读出过程中信号电荷包被移动一个像元位置后,被成功移动的电荷数与原电荷总数的比。电荷转移效率往往与控制转移的时钟频率、栅极驱动电压大小、器件内部半导体硅的体内态和硅/二氧化硅界面态密度有关。在高性能 CCD 成像系统的设计过程中,对电荷转移效率的检测和评估,有助于判断 CCD 驱动时钟频率和驱动电压是否设计合理。如果这两个参数设置合理,信号电荷与界面态及体内态的相互作用是 CCD 器

件电荷转移效率的关键因素。根据电荷转移方向的不同,电荷转移效率包括串行转移效率和并行转移效率,需要分别进行测试。一般而言,电荷转移效率的测试方法主要有同位素 X 射线转移法和扩展像元边缘响应。前者是绝对值测量方法,后者是相对值测量方法。

2.2.1 同位素 X 射线方法测试  $E_{CT}$

如 2.1.1 节,利用  $Fe^{55}$  X 射线可以在 CCD 器件的单个像元上产生固定数量的电子数( $1620 e^-$ ),即单像元事件。对于 CCD 器件,由于单像元事件随机发生在不同的像元,读出过程需要经历的转移次数不尽相同,同时由于转移过程中的电荷损失,同一条谱线的单像元事件的电子数将随像元位置的不同而发生变化,计算经过  $N$  次像元转移后的电荷损失量,便可以得到绝对电荷转移效率的值,如图 1 所示,公式表示为<sup>[4]</sup>

$$E_{CT} = 1 - \frac{D(e^-)}{X(e^-)N}, \quad (2)$$

在上式中, $D(e^-)$  是  $N$  次像元转移后的电荷损失量, $X(e^-)$  是 X 射线信号, $N$  是像元转移的总次数。

$Fe^{55}$  X 射线测量法是  $E_{CT}$  测量的一个有效的方法,但需要注意的是,由于  $Fe^{55}$  的 Mn  $K\alpha$  谱线的光子不能穿透相机的封窗,因此用这种方法测量时要求放射源放入 CCD 成像系统内,直接照射 CCD 表面。

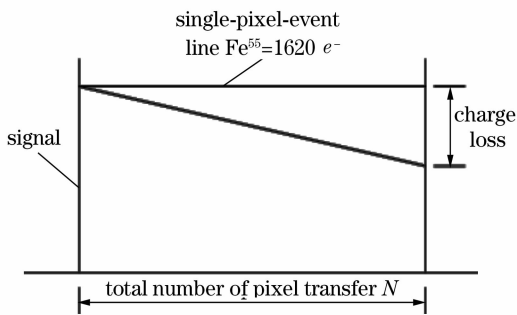


图 1 用同位素 X 射线方法测量电荷转移效率的示意图

Fig. 1 CTE measurement using  $Fe^{55}$  X-ray

2.2.2 EPER 方法测试  $E_{CT}$

另一种测量 CCD 电荷转移效率的方法是扩展像素边界边缘响应 (EPER, extended pixel edge reaction)。EPER 方法是先做一个 CCD 平场,通过测量过扫描区的读出信号来计算电荷转移效率。过扫描区即 overscan 区,就是在读完实际物理像元后再多读几行或几列的值,过扫描区中的读出信号实际上是器件最后一行或列经过若干次转移后残留在器件中的电荷。假设对于一个  $M$  列的器件,最后一列的读数是  $A$ ,过扫描区读出的扩展列的信号累积

为  $L$ ,则可认为对于该器件,一个信号为  $A$  的电荷包经过  $M$  次转移后,电荷损失数为  $L$ ,这样就可以得到 CCD 器件的串行电荷转移效率。公式如下:

$$E_{CT} = 1 - \frac{L}{A \times M}, \quad (3)$$

CCD 器件的噪声、光源的均匀性和像元响应的一致性影响这种方法测量电荷转移效率的主要因素。与  $Fe^{55}$  X 射线测量法相比,EPER 方法较为简单易行。但它的缺点是 CCD 相机必须可以进行过扫描区读出,否则不能使用该方法,而放射性同位素测量法对 CCD 相机控制模块没有特殊要求。

2.3 读出噪声

CCD 器件的噪声源主要有:光子散粒噪声 (Photon shot noise)、暗信号散粒噪声 (Dark signal shot noise)、放大器噪声 (Amplifier noise)、量化噪声 (Digitization noise)、复位噪声 (Reset noise) 和固定模式噪声 (Fixed pattern noise) 等<sup>[5]</sup>。按照与读出信号的关系,分为两大部分。一部分与读出信号有关,服从泊松统计分布规律,另一部分与读出信号强度无关,称之为读出噪声,它是 CCD 器件在无辐射照射、无积分条件下的输出噪声。

在 CCD 成像器件的测试中,通常用读出噪声来评估器件的噪声水平。测试 CCD 器件的读出噪声主要有三种方法。第一是光子转移技术,在测量增益的同时可以得到器件的读出噪声,光子转移曲线在纵轴上截距的平方根就是以 ADU 为单位的读出噪声<sup>[6]</sup>。另一种方法是统计 CCD 本底图像过扫描区局部区域的均方差(本底图像是 CCD 器件在无辐射、无积分条件下的输出图像),也可以得到以 ADU 为单位的读出噪声,但是这种方法的条件是 CCD 相机可以设置为过扫描区读出。另外一种简单可行的方法是直接统计本底图像的均方差,可以采集多幅本底图像,取其中最接近的两幅本底图像相减,计算该差值图像局部区域的均方差,这个数值除以  $\sqrt{2}$  就是以 ADU 为单位的读出噪声。

2.4 线性和满阱电荷

CCD 器件的线性特性反映了输入信号和输入信号之间的变化关系。对于一个理想器件,若用  $S_{out}$  代表输出,  $S_{in}$  代表输入,  $B$  为本底,则应有:  $S_{out} - B = k \times S_{in}$ 。我们以  $S_{out}$  对  $S_{in}$  作直线拟合的相关系数来表征器件的线性度<sup>[7]</sup>。设计的测量器件线性性能的方法如下:通过调节 CCD 相机的曝光时间(对于曝光时间固定的系统,可以调节光源强度)获得不同强度的均匀曝光图像,每个曝光时间拍多幅

进行平均从而减少噪声的影响。然后以不同曝光时间下输出图像的平均值作纵坐标,对应曝光时间为横坐标作出一条曲线,该曲线就是 CCD 的线性响应曲线。对此曲线进行线性拟合,输出信号和曝光时间直线拟合的相关系数即 CCD 器件的线性性能指标。

满阱电荷定义为器件像元势阱中所能容纳的电荷数量。当线性响应曲线的输出随着输入信号的增强不再增加时,便到了 CCD 器件的饱和状态,对应的数字量输出值(ADU)与增益的乘积就是满阱电荷。

## 3 实验研究

### 3.1 CCD 及主要参数

根据第 2 节 CCD 性能测试方法,对 E2V 公司  $4K \times 4K$  芯片 CCD203\_82 进行了测试实验。CCD203\_82 是面向天文高分辨率观测或其它高性能成像系统设计的科学级芯片,像元大小  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ,光敏面积  $49.2 \text{ mm}$  ( $49.2 \text{ mm}$ ,通过背面照光模式可以在可见光波段获得高达 90% 的量子效率<sup>[8]</sup>。驱动 CCD203\_82 工作的 CCD 控制器是国家天文台探测器实验室研制的高性能低噪声天文阵列器件控制采集系统<sup>[9]</sup>。同时,CCD 芯片放置到真空杜瓦瓶中并对其进行制冷,制冷采用 CryoTiger 制冷系统,CCD 工作温度为  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。CCD 控制器设置的像素读出速率为  $50 \text{ KHz}$ ,为双通道过扫描读出模式<sup>[10]</sup>。

### 3.2 实验装置

图 2 是 CCD 性能测试使用的实验平台,该平台可用于 CCD 的增益、读出噪声、线性、满阱电荷、电荷转移效率和量子效率等多种性能指标的检测。平台的主要设备有:稳定光源、滤光片组、单色仪、积分

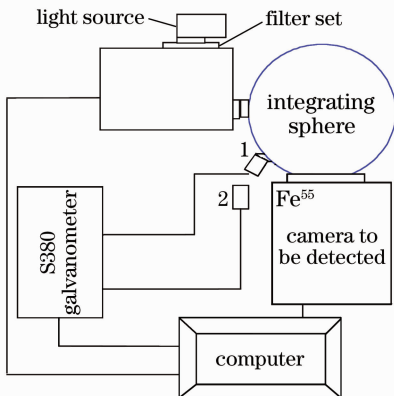


图 2 CCD 成像器件性能测试实验平台

Fig. 2 Platform of evaluating CCD imaging sensor

1: monitoring probe, 2: calibrating probe

球、 $\text{Fe}^{55}$  放射源、S380 双通道检流计、监测探头、定标探头和控制计算机。

### 3.3 实验结果与分析

#### 3.3.1 增益

首先用同位素 X 射线方法对增益进行了测试实验。将 CCD203\_82 置于  $\text{Fe}^{55}$  辐射下,获得一幅 X 射线的图像,并对单像元 X 射线事件的进行统计。图 3 是对图像局部区域统计的结果,图中横坐标是读出信号,纵坐标是该输出信号出现的频率(像元的数量)。图中可以看到两个明显的波峰,第一个是图像本底的值,约为  $1067 \text{ ADU}$ ,第二个是由于单像元 X 射线事件形成的峰值,读出值为  $2015 \text{ ADU}$ ,二者相减即为单像元 X 射线事件产生的绝对读出值,为  $948 \text{ ADU}$ 。由前面分析得知,单像元事件产生的电子是  $1620 e^-$ ,用  $1620$  除以  $948$  就得到 CCD 器件的增益,为  $1.7089 e^-/\text{ADU}$ 。选择不同的区域进行计算以及进行多次测量,增益的结果基本都在  $1.7089 e^-/\text{ADU}$  左右,数值变化区间保持在 1%,说明用同位素 X 射线方法测试增益具有较高的精度和稳定性。

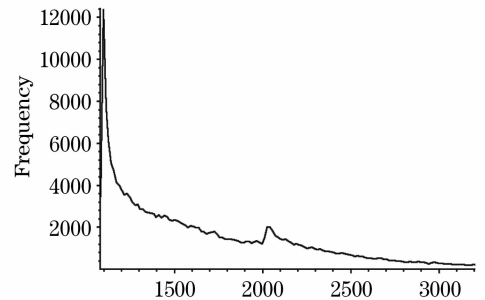


图 3 CCD203\_82 X 射线单像元事件统计直方图

Fig. 3 CCD203\_82 X-ray histogram that plots a single-pixel event

另外,用光子转移技术对增益也进行了三次测试,测量的结果分别为  $1.8021 e^-/\text{ADU}$ ,  $1.8835 e^-/\text{ADU}$ ,  $1.6993 e^-/\text{ADU}$ ,数值的稳定性较差而且误差较大,在 3% 左右。所以在以下读出噪声、满阱电荷等特性的评估中,增益的值以 X 射线方法测得的为准。

#### 3.3.2 同位素 X 射线方法测试 $E_{\text{TE}}$

用同位素  $\text{Fe}^{55}$  对电荷转移效率进行测试时,需要挡住环境中的其它光源,保证 CCD 不受杂散光的影响而接受  $\text{Fe}^{55}$  的辐射。然后统计多幅图像,将读数按列或行坐标作图,由单像元事件形成的谱线将在图上清晰可见。这样随着转移次数的增加单像元事件损失的电子数将会增加,谱线在图中发生倾斜。直线拟合该单像元事件谱线可得到转移造成的电荷

损失量,从而计算电荷转移效率。图 4 是将 CCD 读出信号按照列坐标作图的结果,可清楚地看到的直线是 5.9 keV 光子单像元事件线,可以看出,经过

2048 列的转移后,谱线基本水平,电荷损失为  $22 e^-$ 。代入(2)式进行计算,串行电荷转移效率为 0.999993。

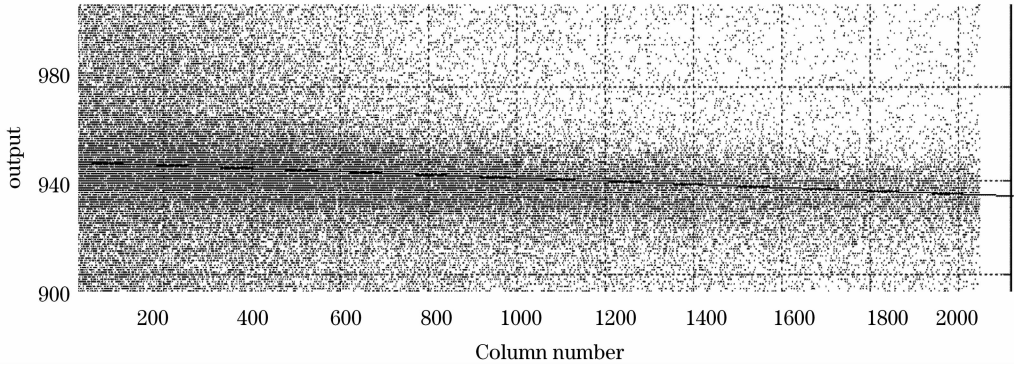


图 4 实测 CCD203\_82 X 射线转移图

Fig. 4 Horizontal X-ray transfer plot measured for CCD203\_82

### 3.3.3 EPER 方法测试 CTE

为了进行对比,用 EPER 方法对 CCD203\_82 电荷转移效率也进行了测试实验。先将相机设置为过扫描读出模式,然后在均匀光源下获得 CCD203\_82 的平场图,分别统计扩展列中的平均信号  $L$  和最后一列的信号  $A$ ,那么  $L$  就是一个信号为  $A$  的电荷包经过 2048 次转移后的电荷损失量(相机设置为双路读出,所以转移次数为 2048)。这些数值代入公式 3 即可计算出电荷转移效率。表 1 为用该方法测得的在不同信号强度下 CCD203\_82 串行转移效率。

用 EPER 方法测试电荷转移效率灵活方便,同时可以测试不同信号强度下器件的电荷转移效率值。对于同位素 X 射线方法,若研究 CCD 器件电荷转移效率随信号大小的变化,则需要使用不同放射源提供的不同波长的 X 射线。

表 1 用 EPER 方法测试不同信号强度下 CCD203\_82 的电荷转移效率

Table 1 CTE result according to the signal level of CCD203\_82 using EPER method

| Signal level | $3063e^-$ | $14579e^-$ | $35425e^-$ | $67311e^-$ |
|--------------|-----------|------------|------------|------------|
| CTE          | 0.999992  | 0.999993   | 0.999994   | 0.999995   |

### 3.3.4 其他性能的测试结果

基于第二部分讨论的方法,对 CCD203\_82 的读出噪声、线性和满阱电荷等特性也进行了评估。测试读出噪声时,先采集 9 幅本底,为了去除固定模式噪声的影响取其中最接近的两幅图相减,统计差值图像局部区域的均方差,它的值就是以 ADU 为单位的读出噪声的值,约为 1.69 ADU,所以 CCD203\_82 的读出噪声为  $2.9 e^- (1.69ADU \times 1.7089 e^- / ADU)$ 。线性和满阱电荷的测量是通过线性响应曲线,如图 5

所示。它以曝光时间为横坐标,输出信号作纵坐标,反映了输入信号和输出信号之间的线性关系。经过计算,线性性能好于 0.9999,满阱电荷为  $142 Ke^-$ 。

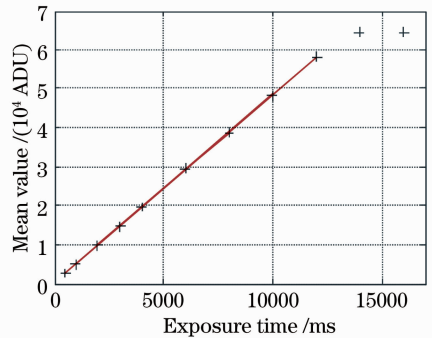


图 5 CCD203\_82 的线性响应曲线,线性度好于 0.9999

Fig. 5 Linear response curve of CCD203\_82 and the linearity is better than 0.9999

## 4 结 论

针对科学应用的需要,本文对 CCD 成像器件性能的测试方法进行了研究,涉及的参数包括增益、读出噪声、电荷转移效率以及满阱电荷等,重点是电荷转移效率和增益。为提高测试的精度,对多种测试方法进行了研究同时针对精度和稳定性进行分析。在理论研究的基础上,提出了一套行之有效的 CCD 性能检测方法,并基于 E2V 公司 4K (4K 芯片 CCD203\_82 给予了检测实验验证。将测试结果与 E2V 公司的数值进行了分析比较,测试结果准确、精度高,这也验证了本文提出的测试方法的可行性和可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 J. Janesick. *Scientific Charge-Coupled Devices* [M]. SPIE Press, 2001
- 2 Gerald C. Holst. *CCD Arrays, Cameras, and Displays* [M]. SPIE Optical Engineering Press, 1998
- 3 Craig D. Mackay, John Baldwin, Nicholas Law. Astronomical imaging with L3CCDs: detector performance and high-speed controller design[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5499**:203~209
- 4 B. Li, C. Wang. New algorithm for absolute CTE Measurement [C]. *Proc. SPIE*, 2006
- 5 M. R. Stanford, B. J. Hadwen. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, **50**(5): 1227~1232
- 6 J. Deng, S. Wang, Y. Shang, Q. Zhi. An infrared imaging system based on SWIR FPA of SOFRADIR[C]. *Proc. SPIE*, 2006, P6276J
- 7 Orly Yadid-Pecht, Ralph Etienne-Cummings. *CMOS Imagers: From Phototransduction to Image Processing* [M]. Kluwer Academic Publishers, 2004
- 8 E2V Company. Back Illuminated 4096 × 4096 Pixels Scientific CCD Sensor Specification. 2005
- 9 Z. Zhao, B. Ye. Astronomical array control & acquisition system at NAOC[J]. *Scientific Detector Workshop*, 2005. 661~668
- 10 Q. Song, B. Ye, Z. Zhao. An EUV image detector for the space solar telescope [J]. *Scientific Detector Workshop*, 2005. 179~185