

线阵 CCD 转移效率及响应度非均匀性 测试装置研究

万光毅 龚晓斌 罗镇伟 苏昌林 胡章鑫

(中国测试技术研究院光电传感器室, 成都 610061)

景 峰

(中国工程物理研究院二所, 成都 610003)

摘 要 介绍了准确测量线阵 CCD 转移效率及响应度非均匀性的实验方法、装置及测试结果. 采用小光点注入法, 在自动化装置上实现数据采集, 用移动寻峰和直线拟合法处理数据. 文章还分析了影响测量结果的诸多因素.

关键词 电荷转移效率, 光响应度非均匀性.

1 引 言

电荷耦合器件(CHARGE COUPLED DEVICE)即 CCD, 属于固体摄像器件中的一种类型. 掌握器件的各种特性参数, 以利于正确使用. 本文仅就电荷转移效率和光响应非均匀性这两项特性参数的测试原理、方法及测试装置与测试结果作一总结.

转移效率是表征 CCD 器件特性的一个重要参数, 它代表器件转移电荷包的能力. 转移效率决定了器件的规模, 并能影响器件的调制传递函数. 转移效率的测量, 主要采用电注入和光注入两种方法. 由于许多专用于摄像的器件没有电荷注入端, 因此电注入法不能普遍使用. 小光点注入法可用于各种 CCD 器件. 转移效率和光响应非均匀性是相互影响、紧密联系的. 光响应非均匀性影响转移效率的测量, 反过来, 转移效率又会影响光响应非均匀性测量. 本文采用移动寻峰法和直线拟合法进行数据处理, 在自动化测量系统上快速准确地完成了转移效率和光响应非均匀性的测量.

2 测试原理及方法

2.1 定义

* 本文以中华人民共和国国家计量技术规范“线列固体图像传感特性参数测试”(JJG1037-93)为依据

收稿日期:1992年12月4日; 收到修改稿日期:1993年3月29日

转移效率是电荷包在进行一次转移时传输到下一电极的电荷量与原有电荷量的比值,用符号 η 表示

$$\eta = Q_{n-1}/Q_n, \quad (1)$$

式中的 Q_n 为第 n 个电极的原有电荷量, Q_{n-1} 为 Q_n 转移到第 $n+1$ 电极后的电荷量. 光响应非均匀性 (PRNU) 是器件各有效光敏元都在二分之一饱和曝光量条件下, 各自输出的原始响应等效电压信号与其平均值之差的均方根值与平均值的比值; 用符号 $PRNU$ 表示如下:

$$PRNU = \frac{1}{V_0} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{oi} - V_0)^2} 100\%, \quad (2)$$

式中 V_{oi} 为各光敏元输出的原始响应等效电压信号, V_0 为平均值, N 为光敏元数目, i 为光敏元序号. 此外, 还有以下一些问题需要说明:

1) 光响应非均匀性 $PRNU$ 值是对各光敏元光响应不一致性的综合评定. 为了更好地反映个别光敏元的特点, 我们同时给出光响应最大偏差 D_{max} 的定义式:

$$D_{max} = \frac{|V_{max} - V_{min}|}{V_0} 100\%, \quad (3)$$

式中 V_{max} 为 V_{oi} 中的最大值, V_{min} 为 V_{oi} 中的最小值. 将 $PRNU$ 和 D_{max} 结合起来评价器件的光响应非均匀性.

2) 根据 CCD 的工作原理, 器件光敏元的原始响应等效电压 V_{oi} 是不能直接测得的, 只能测出经过转移后的输出电压 V_i . 由于受到转移损失的影响, V_i 与 V_{oi} 有如下关系:

$$V_{oi} = V_i/\eta^n, \quad (4)$$

式中 $n = (N - i)P/m$ 就是第 i 个光敏元的电荷包到输出端需要转移的次数. N 为有效光敏元总数, P 为器件采用的时钟相数, m 为器件的线列结构参数.

3) 除了转移效率 η 还常用转移损失率 ε 这个概念:

$$\varepsilon = 1 - \eta. \quad (5)$$

2.2 转移效率计算中的直线拟合法

最早的小光点法是将小光点照在最远离输出端的有效光敏元上, 其电荷量经 M 次转移后到达输出端, 测得其输出信号值为 V_M , 再将同一小光点照在最靠近输出端的有效光敏元上, 测得其输出信号为 V_0 , 得:

$$TTE = V_M/V_0. \quad (6)$$

然后按公式 $TTE = \eta^M$ 求出平均转移效率. 使用这一方法的前提是各光敏元为理想的均匀响应, 即量子效率和电荷收集效率均相同; 其次是每相邻两个电极下的电荷转移效率 η 要相同. 但严格说来这两个前提都不成立. 由于制造工艺等原因, 必然造成光敏元及 CCD 移位寄存器的不均匀性, 同时由于器件和电路噪声的影响, 仅通过测试两个光敏元或少数几个光敏元的输出来确定转移效率的误差较大. 为此, 将小光点分别依次对准每个光敏元扫描, 得到各个光敏元的输出信号 V_i , 然后再对 N 个 V_i 值进行直线拟合.

按前述转移效率的意义, 注入器件的光信号产生的原始电信号 V_{oi} 与经过 n 次转移后到达输出端的电信号 V_i 有以下关系:

$$V_i = V_{oi}\eta^n \quad (7)$$

图 1 给出了该式反映的不同 η 下转移次数 i 与 V_i 的关系曲线^[3]. 由图可看出, 当 η 值较大时 (ε

< 0.001), V_i 与 n 基本上是成线性关系的, 于是(7)式可近似为

$$V_i = C_1 - n C_2 \quad (8)$$

式中, C_1 、 C_2 均为常数, 因此, 在一定条件下, CCD 器件的输出信号是与电荷转移次数成线性关系的. 根据最小二乘法原理, 可以测出与不同转移次数 n 对应的输出值 V_i , 得到一组由(8)式代表的线性方程. 显然要确定这个方程, 应选择适当的 C_1 、 C_2 值, 以使下式的值最小:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^N [V_i - (C_1 - C_2 n)]^2, \quad (9)$$

V_i 为实测值, 根据最小二乘法原理, 计算机可算出 C_1 、 C_2 值来. 于是可得到总转移效率:

$$TTE = 1 - M C_2 / C_1 \quad (10)$$

再由(6)式得到转移效率

$$\eta = TTE^{1/M} \quad (11)$$

式中 M 为最大转移次数. 图 2 即为直线拟合方法示意图, 图中的实线为拟合线, 散点为各光敏元输出.

测出了每个光敏元在相同曝光量条件下的响应输出值 V_i , 直接从定义(2)至(4)式中得到器件的光响应非均匀性. 实际上, 器件的光响应非均匀性就是各光敏元的响应输出相对于拟合线的偏差. 采用最小二乘法, 利用得到的大量数据, 较好地克服了转移效率对光响应非均匀性测量结果的影响, 同时也较好地消除了涨落噪声对测量结果的影响.

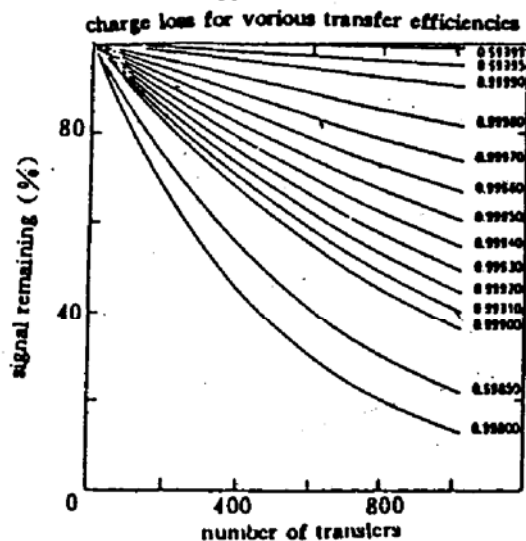


Fig. 1 Variation of V_i/V_{0i} as a function of transfer times n under fixed value of η

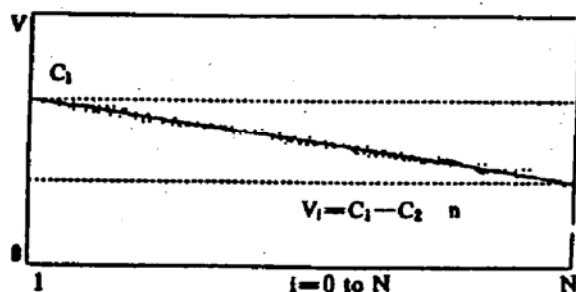


Fig. 2 Output voltages of elements and linear data-fitting

2.3 数据采集中的移动寻峰方法

由上面分析, 用直线拟合法测量器件的转移效率和光响应非均匀性, 必须先测得各个光敏元分别在相同小光点入射条件下的响应输出. 我们知道, 理想的光敏元的响应函数应该是呈矩形的或梯形的, 如图 3(a)所示. 但是, 由于少数载流子的扩散, 以及在光敏元边缘地区入射到光敏元的能量有所减少等原因, 实际测得的光敏元响应如图 3(b)所示. 即在光敏元的几何中心或中心位置附近有一极大值. 如果小光点在对一个光敏元的扫描过程中, 是以微小的空间、时间间隔进行采样, 则光敏元的响应必在光敏元中心附近出现极大值, 该信号即可代表该光敏元的响应. 移动寻峰的方法, 正是基于这一物理事实. 图 4 中一个光敏元上有 10

个测量点，测量点之间的间距为光敏元中心节距的 1/10. 打“×”的地方为光敏元输出峰值.

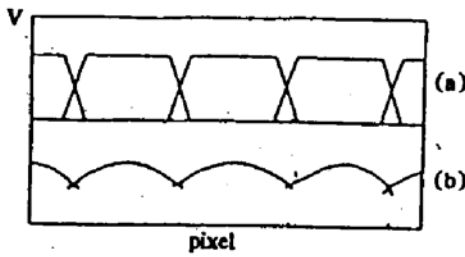


Fig. 3 Sensor geometry aperture response function

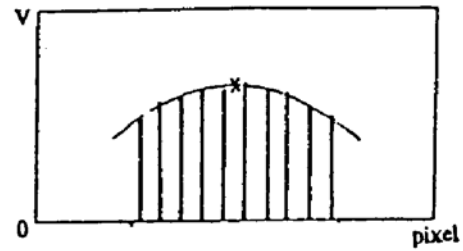


Fig. 4 Scanning peak-searching

3 测试装置

本装置采用小光点注入法实现对被测器件转移效率和响应度非均匀性的测量. 由小光点光学系统, CCD 驱动器及其信号处理系统, 精密微动工作台和微机自动测试系统组成. 为了保证光学系统形成均匀小光点, 采用二级照明方式. 光学系统结构如图 5 所示. 照明灯泡选用 6 V、5 W 的溴钨灯. 小光点的亮度可通过限制光栏调节. 小光点色温为 2856 K, 稳定性为每小时 0.05%, 光功率调节范围 0~3.2 nW, 几何尺寸为 3.5 μm×125 μm. 光学系统安装在大型工具显微镜的主柱上, 并带有观测显微镜, 可通过升降机构调节被测器件和小光点之间的相对位置. 精密微动工作台是利用仪器底座上的千分筒螺杆带动, 使其沿着 X 方向移动. 微动工作台在 X 方向的最小位移为 0.07 μm, 最大扫描范围 30 mm.

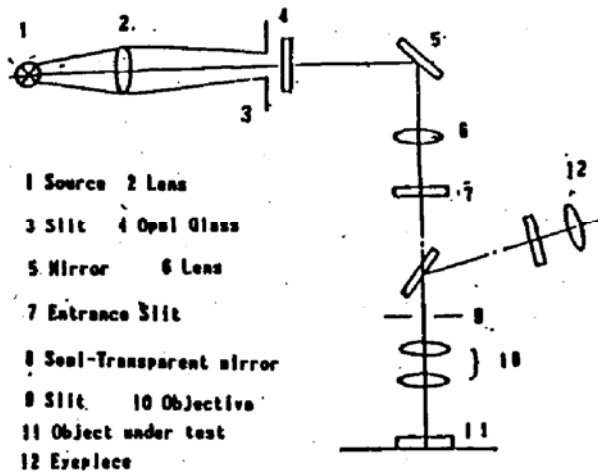


Fig. 5 The optical arrangement for measurement system

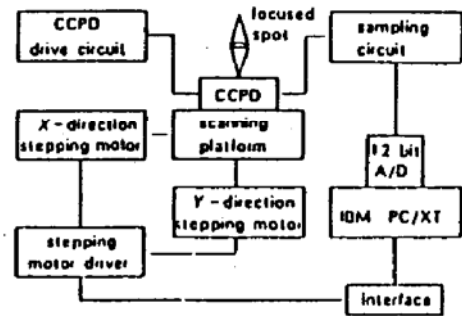


Fig. 6 Diagram of measuring apparatus

由光学系统产生的矩形小光点照射在被测器件的光敏面上, 调整被测器件的位置, 由步进电机带动微动工作台沿 X 方向即光敏元阵列方向移动, 小光点依次扫描各光敏元, 输出信号通过相关双采样电路进行放大、钳位、采样保持及滤波后送入计算机. 由计算机通过 12 位 A/D, 采用中断方式实现对被测器件输出信号的同步实时采集, 逐个把各光敏元输出信号电压存入计算机. 经运算处理得到所要求的测量结果. 装置结构框图见图 6. 由于机械传动误差和半导体光刻带来的光敏元中心节距的差异, 若扫描间隔等于光敏元的中心节距, 就很难保证在扫描过程中小光点都能准确落在每个光敏元的几何中心上. 为此, 减小扫描间隔, 微动工作台每次移动的距离为光敏元中心节距的 1/8, (光敏元中心节距在 7μm~25 μm 之间, 视不同器件而异). 步进 8 次可完成对一个光敏元的扫描过程. 每步进一次测得一个输出信号波

形,连续步进 8 次,得到 8 个动画图片如图 7.



Fig. 7 Output signal of an element at eight different stages of scanning

以一个光敏元中心节距的 $1/8$ 作为扫描间距,小光点在各光敏元上逐步移动,CCD 输出信号幅度变化如图 8 所示. 通过软件寻出各个波峰值作为相应光敏元的输出值. 实测数据表明,大多数光敏元输出峰值的位置是在光敏元的几何中心上,少数光敏元的输出峰值在几何中心点左或右一步的位置之上.

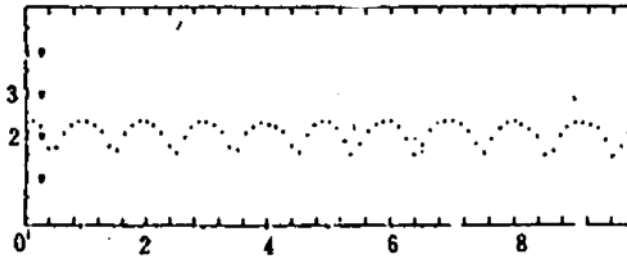


Fig. 8 Amplitude change of CCD output signal at continuous scanning

图 9(a)和(b)分别为日本 TCD142 及国产 DL40 型器件的实测数据的散点图,图中的实线为拟合直线,纵坐标为光敏元响应输出信号电压. 横坐标为光敏元序号. 图 9(c)为美国 RL512S 的实测结果,因其无转移效率,故不作拟合线.

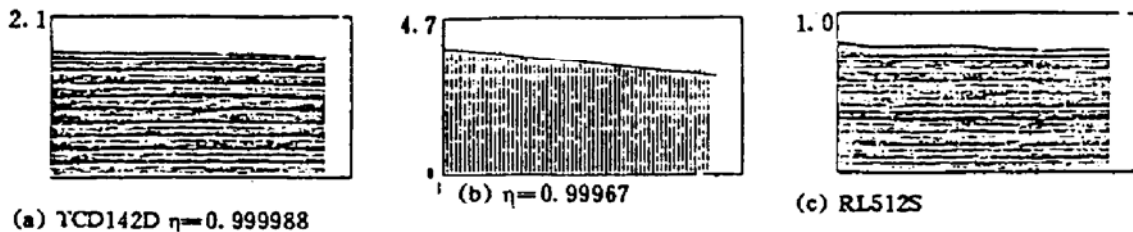


Fig. 9 The measurement results

4 测试结果

用上述装置和方法,对表 1 中所列的国内外几种有代表性的器件作了测试,四种典型器件的测试结果如表 2 所列.

Table 1 Some CCD models measured in this paper

model	type	element size	saturated output voltage	number of pixels	manufactures
TCD102D	BCCPD	14 μm	1.06 V	2048	TOSHIBA
TCD142D	BCCPD	14 μm	2.13 V	2048	TOSHIBA
RL512S	SSPD	25 μm	4.85 V	512	RETICON
DL40	SCCD	13 μm	0.85 V	256	CHINA

Table 2 Results of measurement for 4 models listed in Table 1

model	total transf. eff. TTE (%)	transfer eff. η (%)	photo-response non-uniformity (PRNU) (%)
RL1024S	/	/	0.8
DL40	70.4	99.9536	10.2
TCD102D	95.8	99.9979	2.7
TCD142D	91.5	99.9985	4.2

将同一器件(TCD102D)的测量次数重复性如表 3 所列, 如从测试台上取下又重新装上, 测试它的复现性, 实测 TTE 的复现性在 $\pm 1.5\%$ 以内. 测量结果如表 4 所列.

Table 3 Test on measurement reproducibility

time of measurement	η	TTE
1-st	0.999974	94.8%
2-nd	0.999970	94.0%
3-rd	0.999971	94.3%

Table 4 Test on measurement reproducibility

time of measurement	η	TTE	PRNU	D_{max}
1-st	0.999976	95.2%	1.6%	6%
2-nd	0.999977	95.3%	1.6%	6%
3-rd	0.999974	94.8%	1.5%	5%
4-ch	0.999979	95.6%	1.6%	6%

通过误差传递计算转移效率 η 值的不确定度:

$$TTE = \eta^M$$

$$d\eta/\eta = d(TTE)/(M \times TTE) \quad (12)$$

式中的 $d(TTE)/(TTE)$ 即为 TTE 的测量不确定度, $d\eta/\eta$ 为 η 的测量不确定度, 故

$$d\eta/\eta = \pm 1.5\%/M \quad (13)$$

对两相双列结构的 2048 元器件 TCD102D 和 TCD142D, 最大转移次数 M 就等于 2048, 因此

$$d\eta/\eta = \pm 1.5\%/2048 = \pm 0.000007$$

即 η 在小数点后第 6 位才出现误差, 前 5 位数字是可靠的.

对三相单列结构的 256 元器件 DL40, 最大转移次数等于 768, 因此, $d\eta/\eta = \pm 0.00002$, η 值可保证小数点后面的 4 位数字是可靠的.

5 对测试结果有影响的其他一些因素

5.1 光源相对光谱功率分布对测量结果的影响

为了考查光源对测量结果的影响, 做了下述实验: 其它条件不变, 在光源的三个色温值下对 TCD102D 进行测量, 测量的结果如表 5 所列.

Table 5 effect of relative energy spectral distribution on measurement

color temp.	η	TTE	PRNU	D_{max}
$T_c = 2200K$	0.999977	95.3%	1.6%	6%
$T_c = 2440K$	0.999974	94.8%	1.6%	6%
$T_c = 2590K$	0.999972	94.4%	1.5%	6%

由表中数据可看出, 当光源色温在小范围内变化时 ($< 400K$), 测量结果的变化值在测试误差允许的范围, 因此, 可以认为它对测量结果影响不大.

5.2 信号电荷包大小对转移效率的影响

表面沟道 CCD 的转移效率对信号电荷包大小的依赖主要是由于界面俘获效应. 界面态对电荷的俘获可看作是电荷转移中的一种固定损失, 即界面陷阱总需要一部分电荷去填补, 而这些电荷被重新释放出来后未能跟上原电荷包的部分就构成电荷转移损失. 电荷包越大, 这部分损失所占的比例就越小, 转移效率也就会越高. 图 10 即是对国产表面沟道 CCD 器件 DL40 在不同曝光量下转移效率的测量结果, 纵坐标代表输出信号电压, 它正比于信号电荷包大小. 图 10(a)、(b)和(c)中的信号电荷包大小分别为满阱电荷包的 40%、50%和 90%, 测得的转移效率值分别为 0.99898、0.99967、0.99977. 对于埋沟道 CCD 器件, 信号电荷包大小对转移效率的影响就不是那么显著, 这是因为埋沟道结构消除了表面陷阱态的影响. 正是由于信号电荷包大小对测试结果有影响, 因此, 在参数定义和测试过程中, 都坚持以饱和曝光量的一半作为测试条件.

此外, 转移效率与时钟脉冲波形及工作频率有关. 因文章篇幅所限, 不再赘述.

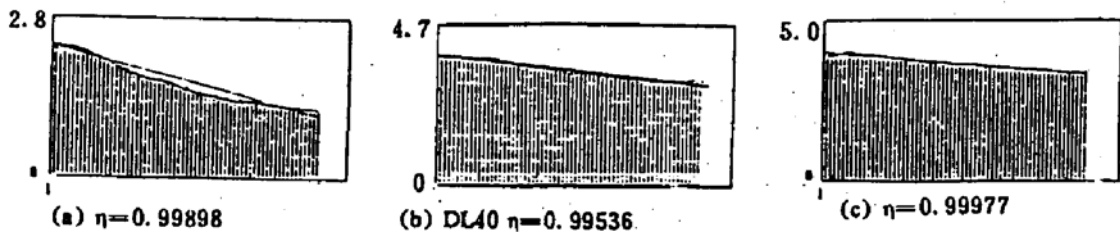


Fig. 10 Effect of charge-packet size on transfer efficiency

结 论 小光点法适合于评价 CCD 摄像器件的特性, 它既可同时完成转移效率和光响应非均匀性的测量, 也可对器件的灵敏度、动态范围、空间分辨率等特性作深入的研究.

采用直线拟合法计算转移效率, 方法简便. 配合自动化的数据采集系统和移动寻峰等数学处理方法, 使整个测试过程快速、准确, 对 2048 元器件的转移效率已能准确测量到小数点后面第五位.

CCD 特性参数测试装置在研制过程中得到四川大学及上海技术物理所的大力支持和帮助; 得到天津大学张以漠教授、叶声华教授和北京理工大学刘颖教授的指导. 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] James R. Janesick *et al.*, Present and future CCDs for UV and X-ray scientific measurements. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, 32(1): 409~416
- [2] Patric M. Epperson *et al.*, Electro-optical characterization of tektronix TK512M-011 charge-coupled devices. *Opt. Engng.*, 1987, 26(8): 715~723
- [3] J. D. Orbock *et al.*, Charge transfer efficiency measurements at low signal levels on STIS-SOHO TK1024 CCD's. *Proc. SPIE*, 1990, 1242: 105~112
- [4] H. H. Hosack *et al.*, Transfer inefficiency effects in parallel transfer charge-coupled linear imaging devices. *IEEE Trans. Electron Devices.*, 1975, ED-22(3): 152~154
- [5] 董量初等, CCD 摄像器件光响应均匀性测量. *红外研究*, 1990, 9(4): 301~308
- [6] 徐 伟, CCD 不均匀性校正. *红外研究*, 1987, 9(4): 167~172
- [7] 林智准等, CCD 转移效率及其实验特性. *半导体光电*, 1985, 6(1): 65~70
- [8] H. H. Hosack *et al.*, Transfer inefficiency effects in parallel transfer charge-coupled linear imaging devices. *IEEE*

Trans. Electron Devices, 1975, 22(3): 152~154

- [9] G. Y. Wan, X. B. Gong, Z. W. Luo *et al.*, An apparatus for automatically measuring characteristic parameters of self-scanned charge coupled photodiode (CCPD) sensor arrays, page 661~666, vol. I, ACTA IMEKO XII 1991, Beijing, China

An apparatus for measurement of charge transfer efficiency and photo-response non-uniformity of linear CCD.

Wan Guangyi Gon Xiaobin Luo Zhenwei

Su Changlin Hu Zhangxin

(National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610061)

Gin Fong

(Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

(Received 4 December 1992; revised 29 March 1993)

Abstract The accurate measuring result of charge transfer efficiency (CTE) and photo-response non-uniformity (PRNU) of linear CCD image sensors have been described in this paper. A automatic measuring system, based on the method of focused light spot has been set up. This method of data acquisition and calculation is newish. Factors affecting the characteristic parameters of CCD are analyzed.

Key words charge transfer efficiency, photo-response non-uniformity.