

# CCD 摄象器件光响应均匀性测量

董亮初 唐红兰 陈敏辉

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要**—— 的不均匀度, 理论分析了不均匀度测量对转移效率测量的依赖关系, 得出一种精确测定不均匀度及转移效率的新方法, 建立了测量系统. 实验结果与理论分析相符.

**关键词**—— 电荷耦合器件, 电荷耦合器件测量, 光电器件, 光电器件测量.

## 1. 定 义

迄今为止, 对于 CCD 摄象器件光响应不均匀性尚未有统一的表示方式, 一般以相邻光敏元的相对偏差或以峰-峰偏差来表示. 我们认为这两种表示方式均欠全面, 应以光响应的峰-峰偏差结合均方根偏差来全面反映器件的均匀性情况. 具体表示如下:

不均匀度

$$N_u = \frac{\sigma}{\bar{V}_{0n}}, \quad (1)$$

均方根偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (V_{0n} - \bar{V}_{0n})^2}, \quad (2)$$

峰-峰偏差度

$$N_{u-p} = \frac{V_{0n(\max)} - V_{0n(\min)}}{\bar{V}_{0n}}, \quad (3)$$

平均原始响应

$$\bar{V}_{0n} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{0n}. \quad (4)$$

式中  $V_{0n}$  为第  $n$  个光敏元原始响应等效电压,  $\bar{V}_{0n}$  为平均光敏元原始响应等效电压,  $N$  为器件光敏元总数,  $n$  为第  $n$  个光敏元.

峰-峰偏差度  $N_{u-p}$  比较容易测量, 本文着重讨论均方根偏差  $\sigma$  的测量.

## 2. 原 理

由式(1)、(2)、(4)可知, 只要测得各光敏元的原始响应  $V_{0n}$ , 就可求得均匀度  $N_u$ . 但

根据 CCD 摄像器件的工作原理,  $V_{0n}$  是无法直接测得的, 能直接测得的是原始响应  $V_{0n}$  经过 CCD 转移后的输出信号  $V_n$ . 由于存在转移损失,  $V_n$  总是小于  $V_{0n}$ . 如果满足单电荷包传输条件, 则有

$$V_{0n} = \frac{V_n}{\eta^{np}} \quad (5)$$

式中  $V_n$  为单电荷包注入在第  $n$  个光敏元时的 CCD 输出信号,  $p$  为 CCD 的相数,  $\eta$  为 CCD 平均每次转移效率.

所以, 测得  $V_n$  后, 可由式(5)求出  $V_{0n}$ . 但必须注意, 式(5)中的转移效率  $\eta$  值也是通过实验测定的. 问题是测转移效率常用的“光注入法”恰好是以假定光响应为理想均匀的前提下进行的. 实际上, 转移效率  $\eta$  的测量必然存在实际器件光响应不均匀因素引起的误差. 由式(5)可知,  $\eta$  的测量误差必将引起  $V_{0n}$  误差, 从而引起光响应不均匀度的测量误差, 这是一对似乎无法回避的矛盾. 幸好, 由理论分析得到这样的规律:  $\eta$  的测量值无论偏高或偏低, 都将导致均方根偏差  $\sigma$  值的增大. 由此得到启示: 可以通过求  $\sigma$  极小值的方法, 来同时精确确定不均匀度  $N_u$  及转移效率  $\eta$ .

我们将光敏元分为理想均匀的与不是理想均匀的两种情况来说明转移效率  $\eta$  的测量误差对均方根偏差  $\sigma$  的影响.

## 2.1 光响应是理想均匀的情况

### 2.1.1 转移效率是测准的 ( $\eta = \eta_0$ )

以  $V_{nu}$  表示光响应为理想均匀情况下的 CCD 输出信号, 由式(5)求得

$$V_{0n} = \frac{V_{nu}}{\eta_0^{np}} \quad (6)$$

由于光响应是理想均匀的, 且转移效率是测准的, 故

$$V_{0n} = \bar{V}_{0n} = V_0, \quad (n=1, 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

将式(7)代入式(2)、(1), 可得  $\sigma=0, N_u=0$ . 这说明, 在  $\eta$  测准的情况下得到了正确的结果: 不均匀度为零.

### 2.1.2 转移效率的测量值偏离真实值 ( $\eta \neq \eta_0$ )

$\eta$  可表示成  $\eta = \eta_0 + \Delta\eta$ . 由式(6)得  $V_{0n} = V_{nu} / (\eta_0 + \Delta\eta)^{np} = V_{nu} / \eta_0^{np} \left(1 + \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right)^{np}$ . 因  $\frac{\Delta\eta}{\eta_0} \ll 1$ , 并且  $np \frac{\Delta\eta}{\eta_0} < 1$ , 由式(6)、(7)得

$$V_{0n} = V_0 \left(1 - np \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right). \quad (8)$$

由式(4)、(8)得  $\bar{V}_{0n} = V_0 \left[1 - \frac{1}{2}(N+1)p \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right]$ . 因  $N \gg 1$ , 所以

$$\bar{V}_{0n} = V_0 \left(1 - \frac{1}{2} Np \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right). \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入(2), 得

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left[ \left( \frac{1}{2} N - n \right) p \frac{\Delta\eta}{\eta_0} \right]^2}. \quad (10)$$

由式(10)可知, 由于  $\Delta\eta \neq 0$ , 使  $\sigma > 0$ , 从而  $N_u > 0$ , 这说明尽管光响应是理想均匀的, 理应

$N_u$  值为零, 但由于  $\eta$  没有测准, 得出了  $N_u$  不为零的错误结果. 从图 1 可进一步看出, 这是由于  $\eta$  没有测准, 造成  $V_{on}-n$  曲线整体倾斜而引起的.

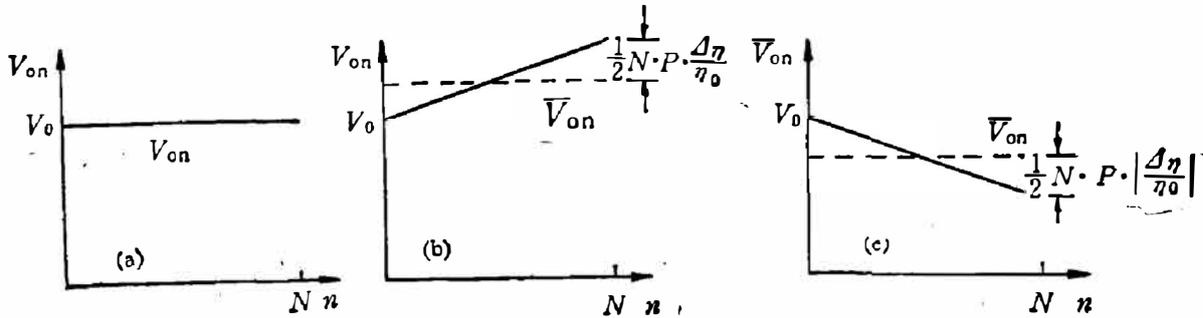


图 1 光敏元理想均匀情况下不同  $\eta$  测量值的  $V_{on}-n$  关系

Fig. 1  $V_{on}$  versus  $n$  for different measured values of  $\eta$  under ideally uniform photo-response.

$$(a) \eta = \eta_0, V_{on} \approx V_0, \sqrt{\Delta V_{on}^2} = 0$$

$$(b) \eta < \eta_0, \Delta\eta = \eta_0 - \eta, \bar{V}_{on} = V_0 \left(1 + \frac{1}{2} N P \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right), V_{on} = V_0 \left(1 + n P \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right)$$

$$(c) \eta > \eta_0, \Delta\eta = \eta_0 - \eta, \bar{V}_{on} = V_0 \left(1 - \frac{1}{2} N P \left|\frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right|\right), V_{on} = V_0 \left(1 - n P \left|\frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right|\right)$$

## 2.2 光响应不是理想均匀的且不均匀性是随机分布的情况

### 2.2.1 转移效率是测准的 ( $\eta = \eta_0$ )

CCD 光响应不是理想均匀, 则器件响应的输出  $V_n$  可表示成理想均匀时的响应  $V_{nu}$  及其偏离  $\Delta V_n$  之和, 即

$$V_n = V_{nu} + \Delta V_n \quad (11)$$

根据式(6), 得

$$V_{on} = \frac{V_{nu} + \Delta V_n}{\eta_0^{np}} = V_0 + \Delta V_{on} \quad (12)$$

因光响应的不均匀性是随机的, 故  $\sum_{n=1}^N \Delta V_{on} = 0$ , 所以平均原始响应  $\bar{V}_{on} = V_0$ . 由式(1)、(2)得

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\Delta V_{on})^2}, \quad (13)$$

$$N_u = \frac{1}{V_0} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\Delta V_{on})^2}. \quad (14)$$

式(13)说明, 在转移效率测准的情况下,  $\sigma$  仅与光响应的偏离  $\Delta V_{on}$  有关, 此时  $N_u$  真正表征了光响应的不均匀度.

### 2.2.2 转移效率的测量值偏离真实值 ( $\eta \neq \eta_0$ )

同样设  $\eta = \eta_0 + \Delta\eta$ , 由式(5)、(11)、(12)得

$$V_{on} = \frac{V_{nu} + \Delta V_n}{\eta_0^{np} \left(1 + \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right)^{np}} = (V_0 + \Delta V_{on}) \left(1 - n P \frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right),$$

取一级近似, 得

$$V_{0n} = V_0 + \Delta V_{0n} - V_0 n p \frac{\Delta \eta}{\eta_0} \quad (15)$$

因  $\sum_{n=1}^N \Delta V_{0n} = 0$ , 又由式(9)得

$$\bar{V}_{0n} = V_0 - \frac{1}{2} V_0 N p \frac{\Delta \eta}{\eta_0} \quad (16)$$

将式(15)、(16)代入式(2), 得

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \Delta V_{0n}^2 + \left( \frac{1}{2} N - n \right)^2 V_0^2 p^2 \left( \frac{\Delta \eta}{\eta_0} \right)^2 + 2 \Delta V_{0n} V_0 \left( \frac{1}{2} N - n \right) p \frac{\Delta \eta}{\eta_0} \right]} \quad (17)$$

由于  $\Delta V_{0n}$  是随机量,  $\sum_{n=1}^N \Delta V_{0n} = 0$ , 而因子  $\left( \frac{1}{2} N - n \right)$  是单调函数, 故式(17)根式中的第三项为零, 式(17)可以写成

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \Delta V_{0n}^2 + \left( \frac{1}{2} N - n \right)^2 V_0^2 p^2 \left( \frac{\Delta \eta}{\eta_0} \right)^2 \right]} \quad (18)$$

对比式(13)与式(18)可以清楚地看到, 由于  $\eta$  没有测准, 使  $\sigma$  值即式(18)比测准时增加了一项, 此项的大小与  $\left( \frac{\Delta \eta}{\eta_0} \right)^2$  成正比, 即与  $\eta$  的测量误差成正比. 由此说明:  $\eta$  测量值无论偏大或偏小, 都使  $\sigma$  增大, 仅当  $\Delta \eta = 0$  时,  $\sigma$  才得极小值, 此时的  $\sigma$  值真正表征光响应的不均匀性, 所以, 通过求  $\sigma$  极小值的方法可同时准确确定  $\eta_0$  及  $\sigma$  值. 即在测得一组  $V_{n-n}$  数组后, 将一系列  $\eta$  值代入式(5)、(2)、(4), 求出  $\sigma-\eta$  关系曲线, 从中求得  $\sigma$  的极小值  $\sigma_{\min}$  及其对应的  $\eta$  值.

### 3. 测量方法

#### 3.1 实验系统

实验系统如图 2 所示. 其光学部分为小光点装置. 根据光注入法转移效率测量原理:

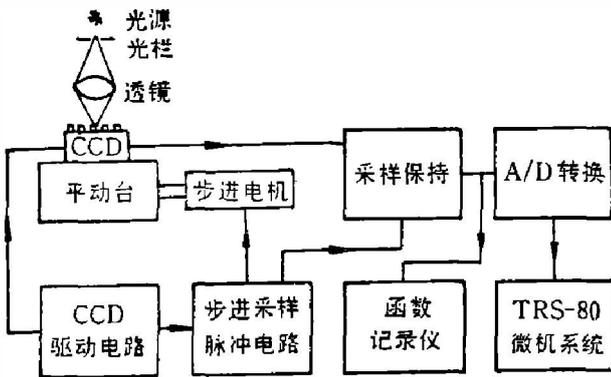


图 2 CCD 信号自动记录系统原理图

Fig. 2 Block diagram of automatic record system for CCD signal

小光点大小只允许照到一个光敏元, 以保证单电荷包注入条件. 现小光点直径小于  $20 \mu\text{m}$ , 而实验用的 CCD 器件相邻光敏元中心距  $30 \mu\text{m}$ , 满足单电荷包注入条件. 机械部分包括平动台及传动装置. CCD 器件被固定在平台上, 平动台在步进电机带动下, 实现小光点沿 CCD 光敏元一维自动扫描. 电子线路包括同步电路与信号处理电路两部分. 同步电路包括 CCD 驱动电路及步进采样脉冲电路, 步进采样脉冲电路受 CCD 驱动电路控制, 而步进电机及采样保持电路同时

受步进采样脉冲电路控制, 以实现空间与时间的同步. 信号处理电路包括采样保持、A/D 转换、接口电路及 TRS-80 微机系统.

### 3.2 测量方法

整个测量过程分两步。首先是数据采集，当小光点从第一个光敏元至最末光敏元扫描时，采样保持电路依次对诸光敏元的输出信号  $V_n$  采样，采样信号经过 A/D 转换后存入微机内存，由此完成  $\{V_n\}$  数组的采集。第二步是数据处理，即求  $\sigma$  的极小值，在采集到  $\{V_n\}$  数据后，给微机系统送入转移效率  $\eta$  的估计值，然后启动一个循环运算程序，求出  $\sigma$  的极小值及所对应的  $\eta$  值，最后，按式(1)求出不均匀度  $N_u$  值。

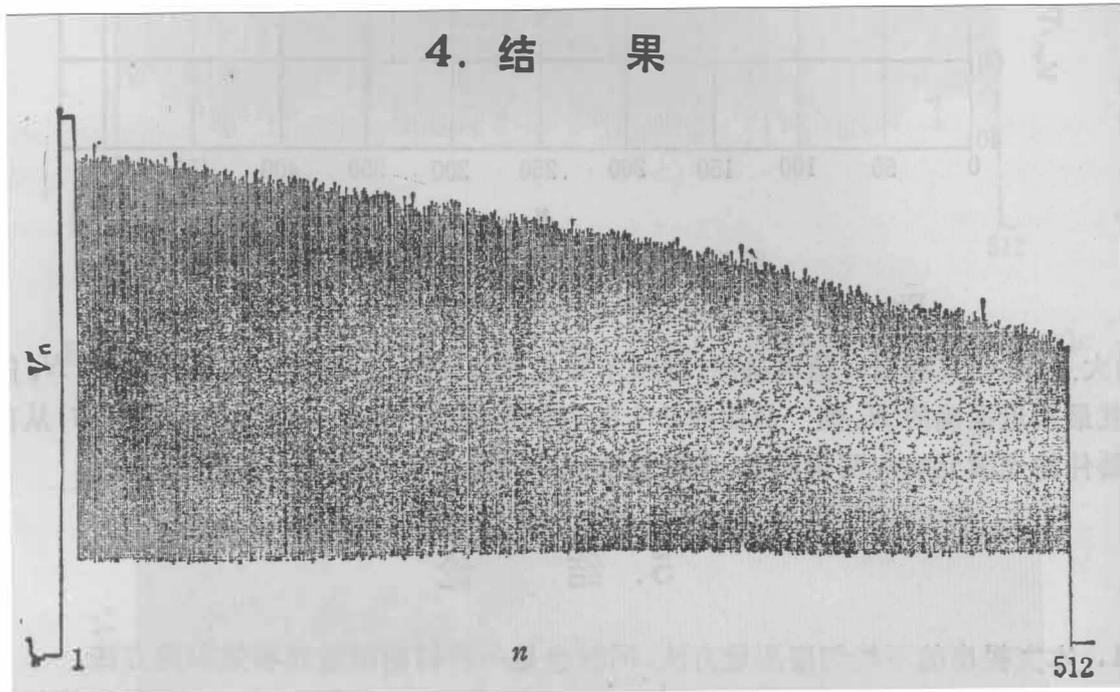


图3 512元 CCD  $V_n-n$  曲线

Fig. 3 Curve of  $V_n$  versus  $n$  for 512-element CCD.

被测器件为 512 位四相表面 N 沟道硅 CCD 器件。图 3 为小光点扫描时测得的  $V_n-n$  关系曲线。图 4 为以一系列  $\eta$  值代入式 (5)、(2)、(4) 时求得的  $\sigma/\bar{V}_{on}-\eta$  关系曲线，从曲线上求得  $\sigma/\bar{V}_{on}$  的极小值为  $2.403 \times 10^{-2}$ ，所对应的  $\eta$  值为 99.9785%。图 5 给出以三种  $\eta$  值计算得到的光敏元原始响应分布图，曲线 1、2、3 所对应的  $\eta$  值为 99.9785%、99.99%、99.96%，均方根偏差  $N_u$  分别为  $2.403 \times 10^{-2}$ 、 $7.012 \times 10^{-2}$ 、 $1.088 \times 10^{-1}$ 。曲线 1 所对应的  $\eta$  最接近真实值  $\eta_0$ ，故没有总体倾斜，曲线上的点随机分布在 100% 线的上下两侧，均方偏差度最小；曲线 2 由于  $\eta$  值大于  $\eta_0$ ，曲线随  $n$  增大向下倾斜，导致  $N_u$  增大；曲线 3 由于  $\eta$  小于  $\eta_0$ ，曲线随  $n$  增大向上倾斜，也导致

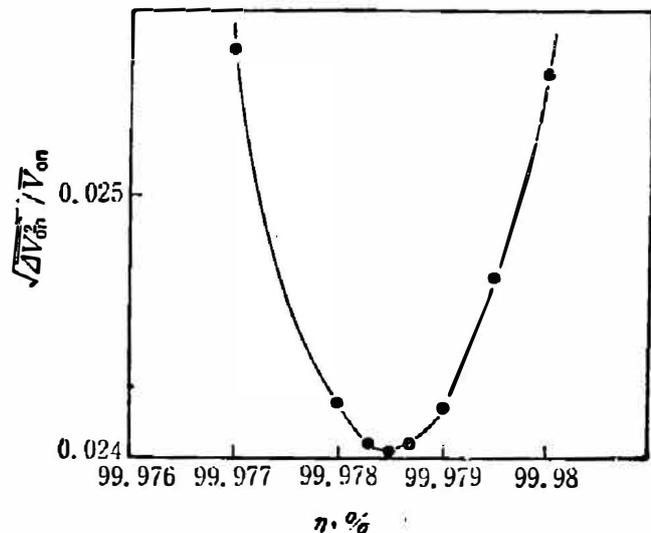


图4 均方根偏差度与  $\eta$  关系

Fig. 4 The rms deviation versus  $\eta$

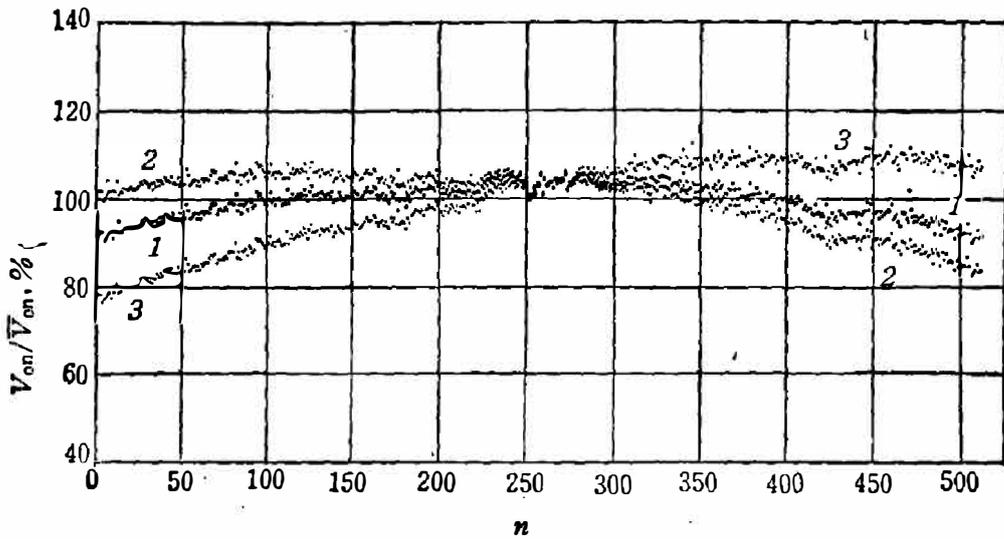


图 5 512 元 CCD  $V_{0n}/\bar{V}_{0n}-n$  曲线

Fig. 5 Curves of  $V_{0n}/\bar{V}_{0n}$  versus  $n$  for 512-element CCD.

$N_u$  增大, 这说明只有当  $\eta$  值准确时, 曲线不发生总体倾斜, 才得到  $N_u$  的极小值,  $N_u$  的极小值也就最接近准确的  $N_u$  值. 故曲线 1 上的点最逼近器件光敏元的原始响应分布, 从曲线看出该器件的光敏元响应两头略低, 中间偏高.

### 5. 结 论

1. 本文提出的不均匀度测量方法, 同时也是一种精确测量转移效率的方法.

2. 利用本系统测得的  $V_n-n$  关系曲线, 还可以将光敏元不均匀性与 CCD 不均匀性区分开来, 图 6、7、8 为 150 元 CCD 器件的三种典型测量结果. 图 6 表示器件的 CCD 部分不均匀性, 在第九位发生故障, 因此, 后面所有光敏元的信号转移到此位时均受影响. 图 7 反映第 98、99、110 位的光敏元不均匀性, 而不是传输的毛病, 所以其余光敏元的信号不受影响.

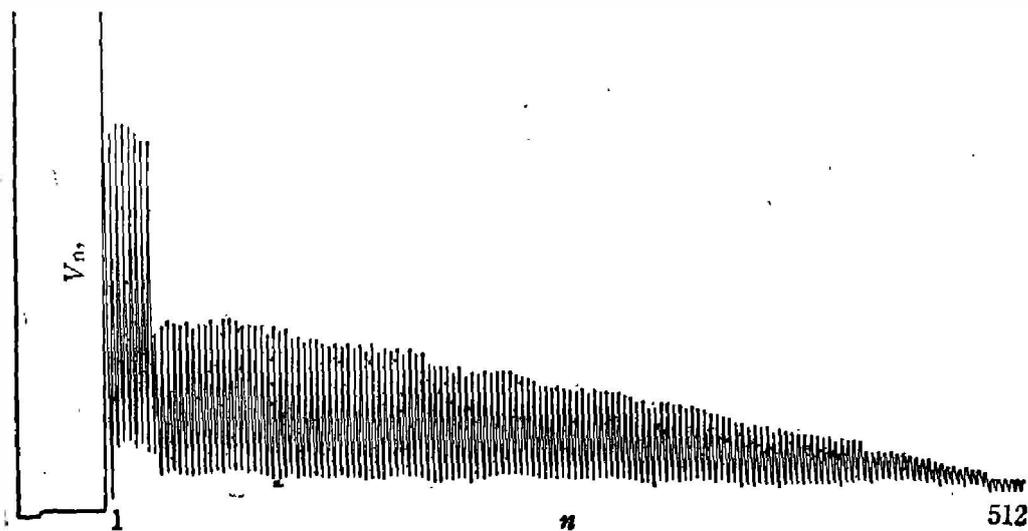


图 6 150 元 CCD  $V_n-n$  曲线 (CCD 不均匀)

Fig. 6 Curve of  $V_n$  versus  $n$  for 150-element CCD (non-uniform CCD)

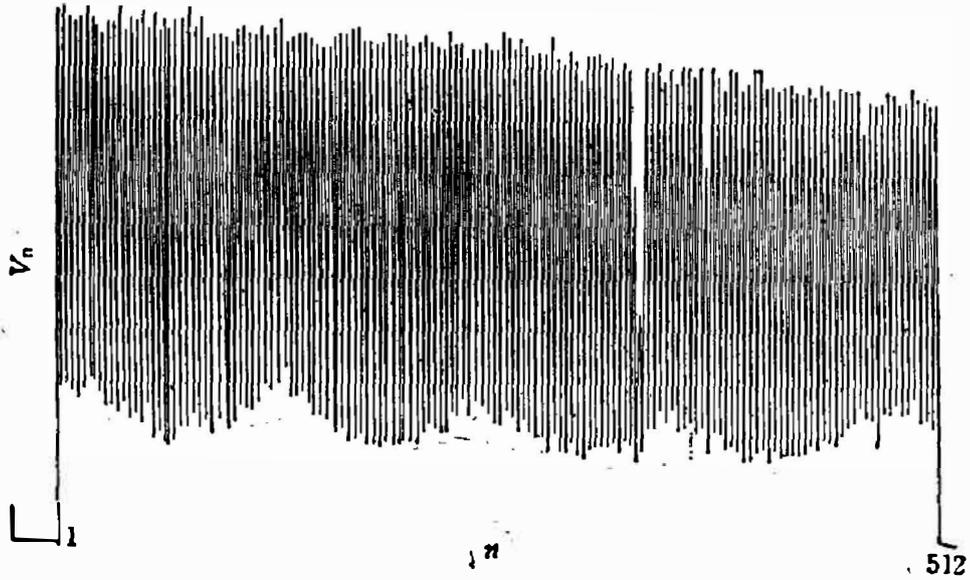


图7 150元 CCD  $V_n-n$  曲线(光敏元不均匀)

Fig. 7 Curve of  $V_n$  versus  $n$  for 150-element CCD (non-uniform photoresponse).

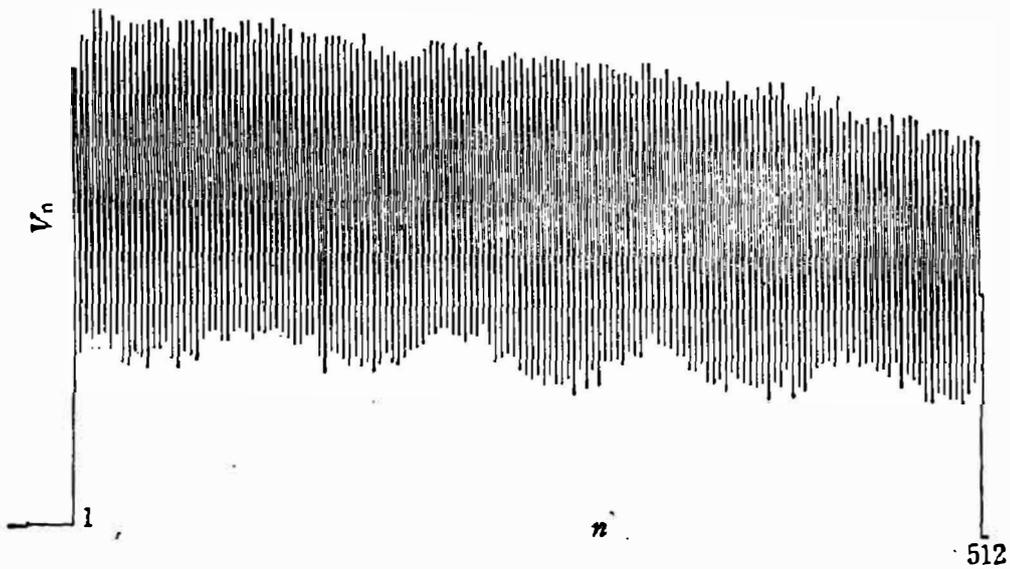


图8 150元 CCD  $V_n-n$  曲线(光敏元及 CCD 都比较均匀)

Fig. 8 Curve of  $V_n$  versus  $n$  for 150-element CCD (uniform CCD and photoresponse).

图8为器件的光敏元及 CCD 都比较均匀的情况。

致谢——本实验用的 CCD 器件由本室工艺组提供,在此表示感谢。

## PHOTORESPONSE UNIFORMITY MEASUREMENT OF CCD IMAGE SENSORS

DONG LIANGCHU, TANG HONGLAN, CHEN MINHUI

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, 200083, Shanghai, China)*

### ABSTRACT

The photoresponse non-uniformity of CCD image sensors can be characterized by rms variance. The dependence of photoresponse non-uniformity on transfer efficiency is analyzed theoretically, leading to a new approach to determine photoresponse non-uniformity and transfer efficiency accurately. A measurement system is set up and the measurement results coincide with the theoretical analysis.