# 第三章 光电转换器件

## 3.1 光电二极管特性的实验研究

光电二极管的伏安特性指的是不同光照条件下输出光电流与偏压的关系,测量原理图如图 3.1 所示,其中负载电阻 RL 的阻值为 2.4 KΩ。



图 3.1 光电二极管测量原理图

光源照度变化时回路测量的光生电流和反向偏压的数据如下表。

	偏压(V)	0	-2	-4	-6	-8	-10
光照度 501x	光生电流(μA)	5.4	5.7	6.0	6.1	6.2	6.3
光照度 1001x	光生电流 (μA)	10.8	11.5	11.7	11.9	12.1	12.2
光照度 2001x	光生电流 (μA)	21.1	22.4	23	23.3	23.9	24
光照度 3001x	光生电流 (μA)	31.4	33.4	34.2	34.9	35.4	36.0

表 3.1 光电二极管伏安特性测量数据

利用上述测量数据可绘制出光电二极管的伏安特性曲线,如下图。



## 3.2 硅光电池特性的实验研究

## 3.2.1 开路电压与短路电流

在太阳能电池的实际应用中,其开路电压和短路电流都不是靠计算而是实际 测量得到的,测量数据如下表所示。

光照度(lx)	0	10	30	50	100	200	300
开路电压(mV)	0	360	390	400	420	440	450
短路电流(uA)	0	4.0	11.8	20.0	42.2	89.3	138.3

表 3.2 硅光电池开路电压和短路电流测量数据



## 3.2.2 伏安特性

其伏安特性研究的是光电池在照度一定的情况下输出电流与电压随负载变化的关系,测量原理如图 3.5 所示。



图 3.5 硅光电池伏安特性测试原理图

化5.5 配行自己的关闭任场重然相	表 3.3	硅光电池伏安特性测量数据
-------------------	-------	--------------

	负载(Ω)	2.4K	5.6K	10K	51K	100K
光照度	电流(uA)	19.8	19.7	19.1	6.9	3.5
501x	电压(mV)	67	135	222	389	399
光照度	电流(uA)	44.7	42.2	31.8	7.5	3.8
1001x	电压(mV)	157	294	373	422	426
光照度	电流(uA)	88.5	57	36.1	7.9	4
2001x	电压(mV)	313	398	423	446	448
光照度	电流(uA)	104.7	60.7	37.7	8.2	4.1
3001x	电压(mV)	372	424	442	459	461



图 3.6 不同照度条件下回路电流与负载电阻关系曲线图



图 3.7 不同照度条件下负载电压与电阻关系曲线图

### 3.3 电荷耦合摄像器件

电荷耦合器件(CCD)与其它器件相比,最突出的特点是它以电荷作为信号, 而其它大多数器件是以电流或电压作为信号。CCD 的基本功能是电荷存储和电 荷转移,因此 CCD 工作过程就是信号电荷的产生、存储、传输和检测的过程, 其中电荷的产生依靠半导体的光电特性,用光注入的办法产生。

### 3.3.1 电荷耦合器件工作原理

#### 1. 电荷存储

构成CCD的基本单元是MOS(金属一氧化物一半导体)电容器,如图 3.8 所示。正像其它电容器一样,MOS电容器能够存储电荷。如果MOS结构中的半导体是P型硅,当在金属电极(称为栅)上加一个正的阶梯电压时(衬底接地),Si-SiO<sub>2</sub>界面处的电势(称为表面电势或界面势)发生相应变化,附近的P型硅中多数载流子—孔穴被排斥,形成所谓耗尽层,如果栅电压V<sub>G</sub>超过MOS晶体管的开启电压,则在Si-SiO<sub>2</sub>界面处形成深度耗尽状态,由于电子在那里的势能较低,可以形象的说在半导体表面形成了电子的势阱,可以用来存储电子。当半导体表面存在势阱时,如果有信号电子(电荷)来到势阱或其附近,它们便可以聚集在表面。随着电子来到势阱中,表面势将降低,耗尽层将变薄,将该过程描述为电子逐渐填充势阱。势阱中能容纳多少个电子,取决于势阱的"深浅",即表面势

的大小,而表面势又随栅电压而变化,栅电压越大,势阱越深。如果没有外来的 信号电荷,耗尽层及其邻近区域在一定温度下产生的电子将逐渐填满势阱,这种 热产生的少数载流子电流叫做暗电流,以区别于光照下产生的载流子。因此电荷 耦合器件必须工作在瞬态和深度耗尽状态,才能存储电荷。



#### 2. 电荷转移

典型的三相 CCD 结构如图 3.9 (a) 所示。三相 CCD 有由每三个栅为一组的间 隔紧密的 MOS 结构组成的阵列。每相隔两个栅的栅电压连接到同一驱动信号上, 也称时钟脉冲。三相时钟脉冲的波形如图 3.9(b)所示。在 $t_1$ 时刻,  $\boldsymbol{\phi}_1$ 高电位,  $\phi_{1}$ 、 $\phi_{2}$ 为低电位。此时 $\phi_{1}$ 电极下的表面势最大,势阱最深。假设此时已有信号 电荷(电子)注入,则电荷就被存储在 $\phi_1$ 电极下的势阱中。 $t_2$ 时刻, $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 高 电位, $\boldsymbol{\phi}_{1}$ 为低电位,则 $\boldsymbol{\phi}_{1}$ 、 $\boldsymbol{\phi}_{2}$ 下的两个势阱的空阱深度相同,但因 $\boldsymbol{\phi}_{1}$ 下面有 存储电荷,则 $\phi_1$ 势阱的实际深度比 $\phi_2$ 电极下面的势阱浅, $\phi_1$ 下面的电荷将向 $\phi_2$ 下面转移,直到两个势阱中具有同样多的电荷。 $t_3$ 时刻, $\phi_3$ 仍为高电位, $\phi_3$ 仍 为低电位,而 $\boldsymbol{\Phi}_1$ 由高到低转变。此时, $\boldsymbol{\Phi}_1$ 下面的势阱逐渐变浅,使 $\boldsymbol{\Phi}_1$ 下的剩余 电荷继续向 $\boldsymbol{\Phi}_{1}$ 、下的势阱转移。 $t_{4}$ 时刻, $\boldsymbol{\Phi}_{2}$ 仍为高电位, $\boldsymbol{\Phi}_{1}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{3}$ 为低电位, $\boldsymbol{\Phi}_{2}$ 、 下面的势阱最深,信号电荷都被转移到 $\phi$ ,下面的势阱中,这与t,时刻的情况相 似,但电荷包向右移动了一个电极的位置。上述各时刻的势阱分布及电荷包转移 情况如图 3.9(c)所示。当经过一个时钟周期T 后,电荷包将向右转移三个电极位 置,即一个栅周期(也称一位)。因此时钟的周期变化就可使 CCD 中的电荷包在 电极下被转移到输出端,其工作过程从效果上看类似于数字电路中的位移寄存 器。



图 3.9 典型的三相电极结构及电荷转移

为了简化外围电路,发展了多种两相 CCD 结构。图 3.10(a)为"阶梯氧化层" 两相电极结构。每一相电极下的绝缘层为阶梯状,由此形成的势阱也为阶梯状。 两相时钟波形如图 3.10(b)所示,电荷的转移过程如图 3.10(c)所示。



图 3.10 两相电极结构及电荷转移

由半导体物理可知,在垂直于界面的方向上,信号电荷的势能在界面 处最小。因此信号电荷只是在贴近界面的衬底层运动,将这种转移沟道在界 面的 CCD 器件称为表面沟道器件,即 SCCD (Surface Channel CCD)。前面 介绍的就是表面沟道 CCD 器件。这种器件工艺简单,动态范围大,但信号 电荷在转移过程中受到表面态的影响,使转移速度和转移效率降低,不宜制 成长线阵及大面阵器件,工作频率一般低于 10MHz 以下。为了避免或减轻 上述不足,研制了体内沟道器件(或埋沟道 CCD),即 BCCD (Bulk or Buried Channel CCD)。这种器件中,用离子注入方法改变转移沟道的结构,从而使 势能极小值脱离界面而进入衬底内部,形成体内转移的沟道,避免了表面态 的影响, 使得该器件的转移效率高达 99.999%以上,工作频率可高达 100MHz,且能做成大规模器件。

#### 3. 电荷检测

电荷输出结构有多种形式,如"电流输出"结构、"浮置扩散输出"结构 及"浮置栅输出"结构。其中"浮置扩散输出"结构应用最为广泛,其原理结构

如图 3.11(a)所示。输出结构包括输出栅 OG、浮置扩散区 FD、复位栅 R、复位 漏 RD 以及输出场效应管 T 等。所谓"浮置扩散"是指在 P 型硅衬底表面用 V 族 质扩散形成小块的 n+区域,当扩散区不被偏置,即处于浮置状态工作时,称作"浮置扩散区"。

电荷包的输出过程如下:  $V_{OG}$ 为一定值的正电压,在OG电极下形成耗尽层, 使 $\Phi_3$ 与FD之间建立导电沟道。在 $\Phi_3$ 为高电位期间,点荷包存储在 $\Phi_3$ 电极下面。 随后复位栅R加正复位脉冲 $\Phi_R$ ,使FD区与RD区沟通,因V<sub>RD</sub>为正十几伏的直流偏 置电压,则FD区的电荷被RD区抽走。复位正脉冲过去后FD区与RD区呈夹断状 态,FD区具有一定的浮置电位。之后, $\Phi_3$ 转变为低电位, $\Phi_3$ 下面的电荷包通 过OG下的沟道转移到FD区。此时FD区(即A点)的电位变化量为

$$\Delta V_A = \frac{Q_{FD}}{C} \tag{3.1}$$

式中*Q<sub>FD</sub>*是信号电荷包的大小,*C*是与 FD 区有关的总电容(包括输出管 T 的输入电容、分布电容等)。输出过程的势阱分布如图 3.11(b)所示,时钟波形与输出电压波形图如图 3.11(c)所示。



图 3.11 信号电荷的检测

CCD 输出信号的特点是:信号电压是在浮置电平基础上的负电压;每个电荷包的输出占有一定的时间长度;在输出信号中叠加有复位期间的高电平脉冲。据此特点,对 CCD 的输出信号进行处理时,较多地采用了取样技术,以去除浮置电平、复位高脉冲及抑制噪声。

### 3.3.2 电荷耦合摄像器件工作原理

将 CCD 的电荷存储、转移的概念与半导体的光电性质相结合,导致了摄像器件的出现。电荷耦合摄像器件有多种分类方法,按结构可分为线阵 CCD 和面阵 CCD;按光谱可分为可见光 CCD、红外 CCD、X 光 CCD 和紫外 CCD。可见光 CCD 又可分为黑白 CCD、彩色 CCD 和微光 CCD。此种重点介绍可见光 CCD。

1. 线阵 CCD

线阵 CCD 有双沟道传输与单沟道传输两种结构,如图 3.12 所示。在同样光 敏元数情况下,双沟道转移次数为单沟道的一半,故双沟道转移效率比单沟道高, 光敏元之间的最小中心距也可比单沟道小一半,双沟道传输的缺点是两路输出总 有一定的不对称。



图 3.12 线阵 CCD 摄像器件

为了叙述方便,一单沟道传输器件为例说明其工作原理。图 3.13 是一个有 N 各光敏元的线阵 CCD。器件由光敏区、转移栅、模拟移位寄存器(即 CCD)、 电荷注入电路、信号读出电路等几部分构成。

光敏区的 N 各光敏元排成一列,光敏元主要有两种结构: MOS 结构好光电 二极管结构 (CCPD)。由于 CCPD 无干涉效应、反射损失、以及对短波段的吸 收损失等,在灵敏度和光谱响应等光电特性方面优于 MOS 结构光敏元,所以目 前普遍采用光电二极管结构。转移栅位于光敏区和 CCD 之间,它用来控制光敏 元势阱中的信号电荷向 CCD 中转移。模拟移位寄存器(即 CCD)通常有两相、 三相等几种结构,下面将以两相为例。一相位转移相,即光敏元下面的信号电荷 先转移到第一个电极下面。排列上,N位 CCD 与 N 个光敏元一一对齐,每一位 CCD 有两相。最靠近输出端的那位 CCD 称为第一位,对应的光敏元为第一个光 敏元,依次及远。各光敏元通向 CCD 的各转移沟道之间有沟阻隔开,而且只能 通向每位 CCD 中的第一相。电荷注入部分主要用来检测器件的性能,在表面沟

道器件中则用来注入"胖零"信号,填充表面态,以减小表面态的影响,提高转移效率。信号输出部分前面已有介绍,此处不再重复。



图 3.14 线阵 CCD 器件的工作波形

两相线阵 CCPD 器件的工作波形如图 3.14 所示,光敏单元始终进行光积分, 当转移栅加高电平时,  $\sigma_1$ 电极下也为高电平,光敏区和 $\sigma_1$ 电极下的势阱接通, N 个光信号电荷包并行转移到所对应的那位 CCD 后中,随后转移栅加低电平, 将光敏区和 $\sigma_1$ 电极下的势阱隔断,进行下一行积分。而 N 个电荷包依次沿着 CCD 串行传输,每驱动一个周期,各信号电荷包向输出端方向转移一位,第一个驱动 周期输出的为第一个光敏元信号电荷包;第二个驱动周期输出的为第二个光敏元 信号电荷包,依次类推,第 N 个驱动周期传输出来的是第 N 个光敏元的信号电 荷包。当一行的 N 个信号全部读完,产生一个触发信号,使转移栅变为高电平, 将新一行的 N 个光信号电荷并行转移到 CCD 中,开始新一行信号的传输和读出, 周而复始。

#### 2. 面阵 CCD

常见的面阵 CCD 摄像器件有两种:行间转移结构与帧转移结构。行间转移 结构如图 3.15 所示,采用用了光敏区和转移区相间排列的方式。它的结构相当 于将若干个单沟道传输的线阵 CCD 图像传感器按垂直方向并排,再在垂直阵列的 尽头防止一条水平 CCD,水平 CCD 的每一位与垂直列 CCD 一一对应、相互衔接。

在器件工作时,每当水平 CCD 驱动一行信息读完,就进入行消隐。在行消隐期间, 垂直 CCD 向上传输依次,即向水平 CCD 转移一行信号电荷,然后水平 CCD 又开始 新的一行信号读出。依次循环,直至将整个一场信号读完,进入场消隐。在场消 隐期间,又将新的一场光信号电荷从光敏区转移到各自对应的垂直 CCD 中。然后 又开始新一场信号的逐行读出。



图 3.15 行间转移面阵 CCD

帧转移结构如图 3.16 所示,它由三部分组成:光敏区、存储区和水平读出区。 这三部分都是 CCD 结构,在存储区及水平区上面均有铝膜覆盖,以实现光屏蔽。 光敏区和存储区 CCD 的列数及位数均相同,且每一列是相互衔接的,不同之处是 光敏区面积稍大于存储区。当光积分时间到后,始终 A 和时钟 B 均以统一速度快 速驱动,将光敏区的一场信息转移到存储区,然后光敏区开始新一场的积分。时 钟 A 停止驱动,一相停止高电平,另一相停在低电平。同时,转移到存储区的光 信号电荷逐行向水平 CCD 转移,再由水平 CCD 快速读出。光信号由存储区到水平 CCD 的转移过程与行间转移面阵 CCD 相同。

两种面阵 CCD 结构各有其优点:行间转移比帧转移的转移次数少,帧转移的 光敏区占空因子比行间转移高。



#### 3. 彩色 CCD

为了形成彩色信号,彩色 CCD 摄像机目前主要有三片式和单片式两种。

三片式 CCD 是传统的摄像方式,该方式用分色棱镜将入射光分成红、绿、蓝 三基色。然后由配置在后面的 CCD 器件转换成电信号,如图 3.17 所示。三片式 CCD 成像质量好,主要用于高质量的摄像机。

单片式 CCD 彩色摄像机结构简单、价格较低,是目前工业、家用摄像机中占 统治地位的彩色摄像机。单片式彩色 CCD 的关键是滤色器的阵列。滤色器阵列的 制作方法有两种:一种是将滤色器阵列制作好之后,按规定的方式与 CCD 器件组 合在一起,另一种是 CCD 制作完毕后再在其上制作滤色器阵列。每一个滤色器单 元对应一个 CCD 光敏元。图 3.18 所示的是两种常用的滤色器形式,拜尔方式滤 色器中,从色单元的数量看是绿色信号占了一半,而红、蓝色单元则占另一半, 在这种方式中两度信号从绿色单元中取出。这种排列方式在行间转移 CCD 器件和 隔行读出的其它器件中,由于奇数场只能读取 R、G 信号,偶数场只能读取 G、B 信号,因此重现的彩色图像会引起黄、蓝闪烁。行间排列的滤色器方式中,绿色 单元的位置和数量均不变化,而使红、蓝色在各行都有,显然这种方式可以克服 拜尔方式滤色器的缺陷。



图 3.17 三片式彩色 CCD





(a) 拜尔方式滤色器(b) 行间排列滤色器图 3.18 常用的滤色器形式

### 3.3.3 电荷耦合摄像器件的特性参数

1. 转移效率

转移效率 $\eta$ 是指电荷包在进行每一次转移中的效率,即电荷包从一个栅转移 到下一个栅时,有 $\eta$ 部分的电荷转移过去,余下 $\varepsilon$ 部分没有被转移, $\varepsilon$ 称转移损 失率。根据电荷守恒原理有

$$\eta = 1 - \varepsilon \tag{3.2}$$

由定义知一个电荷量为 $Q_a$ 的电荷包,经过n次转移后的输出电荷量应为:

$$Q_n = Q_n \eta^n \tag{3.3}$$

总效率为:

$$Q_n / Q_o = \eta^n \tag{3.4}$$

由于 CCD 中的信号都要经历成百上千次的转移,即使η值几乎接近 1,但其 总效率仍然很低。如两相 1024 位器件,当η=0.999 时,总效率不到 0.13。不难 理解,一个器件的总效率太低时,就失去了实用价值。所以一定的η值,限制了 器件的最长位数。目前,表面沟道 CCD 的η值接近 0.9999;埋沟道 CCD 的η值高 于 0.99999。可见,在达到同样高的总效率下,埋沟道 CCD 可以研制的位数比表 面沟道大得多。

#### 2. 不均匀度

CCD 成像器件的不均匀性包括光敏元的不均匀与 CCD 不均匀。本节所讨论的 是光敏元的不均匀性,认为 CCD 是近似均匀的,即每次转移的效率是一样的。

光敏元响应的不均匀是由于工艺过程及材料不均匀引起的,越是大规模的器件,均匀性问题越是突出,这往往是成品率下降的重要原因。

称光敏元响应的均方根偏差对平均响应的比值为 CCD 的不均匀度 $\sigma$ ,即

$$\sigma = \frac{1}{\overline{V_o}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} (V_{on} - \overline{V_o})^2}$$
(3.5)

$$\overline{V}_{o} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} V_{on}$$
(3.6)

式中, $V_{on}$ 为第n个光敏元原始响应的等效电压, $\bar{v}_{o}$ 为平均原始响应等效电压;N为线列 CCD 的总位数。

由于转移损失的存在,CCD 的输出信号V<sub>n</sub>与它所对应的光敏元的原始响应 V<sub>on</sub>并不相等。根据总损失公式,在测得V<sub>n</sub>后,即可求出V<sub>on</sub>,即

$$V_{on} = \frac{V_n}{\eta^{np}} \tag{3.7}$$

式中, *p*是 CCD 的相数,将上式求得的 $V_{on}$  (*n* = 1,2,...*N*) 值代入式(3.5)、(3.6) 中,就可求出 *N* 位线列 CCD 摄像器件的不均匀度 $\sigma$ 的值。

*V<sub>on</sub>*(*n*=1,2,...*N*)必须是单电荷包光注入时的输出信号,因此测试系统必须要有一套小光点自动扫描系统。对于转移效率比较高、总转移损失可忽略的情况,式(3.7)可简化为

$$V_{on} \approx V_n \tag{3.8}$$

即认为 CCD 的输出信号就是光敏元的原始信号,则不均匀性的测量可以不用小光 点扫描,而采用均匀面光源的方法。

不均匀度的表示方法目前尚未统一,人们可以根据各自的测试条件,选择 类似的表示方法。

#### 3. 暗电流

CCD 成像器件在既无光注入又无电注入情况下的输出信号称暗信号,即暗电流。暗电流的根本起因在于耗尽区产生复合中心的热激发。由于工艺过程不完善及材料不均匀等因素的影响,CCD 中暗电流密度的分布是不均匀的。通常以平均

暗电流密度来表征暗电流大小。暗电流的危害有两个方面。

(1) 限制器件的低频限

当信号电荷沿着势阱存储和转移时,热激发产生的暗电流每时每刻地加入到 信号电荷包中,不仅引起附加的散粒噪声,而且占据越来越多的势阱容量。为了 减小暗电流的这种影响,应尽量缩短信号电荷的存储与转移时间。所以暗电流的 存在限制了 CCD 驱动频率的低频限。

(2) 引起固定图像噪声

由于 CCD 光敏元处于积分工作状态,光敏区暗电流也与光信号电荷一样,在 各光敏元中积分,形成一个暗信号图像,叠加到光信号图像上,引起固定图像噪 声,尤其是由于工艺的原因或材料的不完整造成某种缺陷,引起高密度的产生复 合中心,出现个别暗电流尖峰,将使一幅清晰完整的图像,产生某些"亮条"或 "亮点"。

#### 4. 灵敏度(响应度)

它是指在一定光谱范围内,单位曝光量的输出信号电压(电流)。曝光量是 指光强与光照时间之积,也相当于投射到光敏元上的单位辐射功率所产生的电压 (电流),其单位是 V/W(A/W)。实际上摄像器件在整个波长范围内的响应度 就是对应的平均量子效率。所以 CCD 的光谱响应基本上由光敏元材料决定(包 括材料的均匀性),也与光敏元结构尺寸差异、电极材料和器件转移效率不均匀 等因素有关。

#### 5. 光谱响应

CCD 的光谱响应是指等能量相对光谱响应,最大响应值归一化为 100%所对 应的波长,称峰值波长 *λ*<sub>max</sub>,通常将 10%(或更低)的响应点所对应的波长称截 止波长。有长波端的截止波长与短波端的截止波长,两截止波长之间所包括的波 长范围称光谱响应范围。

#### 6. 噪声

CCD 的噪声可归纳为三类: 散粒噪声、转移噪声和热噪声。

(1) 散粒噪声

在 CCD 中,无论是光注入、电注入还是热产生的信号电荷包的电子数,总有 一定的不确定性,正常是围绕平均值上下变化,形成噪声。这种噪声常被称为散 粒噪声, 它与频率无关, 是一种白噪声。

(2) 转移噪声

转移噪声主要是由转移损失及表面态俘获引起的噪声,这种噪声具有积累性和相关性。积累性是指转移噪声是在转移过程中逐次累计起来的,与转移次数成正比。相关性是指相邻电荷包的转移噪声是相关的,因为电荷包在转移过程中,每当有一过量 *AQ* 电荷转移到下一个势阱时,必然在原来势阱中留下一减量 *AQ* 电荷,这份减量电荷叠加到下一个电荷包中,所以电荷包每次转移都要引入两份噪声。这两份噪声分别与前、后相邻周期的电荷包的转移噪声相关。

(3) 热噪声

热噪声是由于固体中载流子的无规则热运动引起的,在 0K 以上,无论其中 有无外加电流通过,都有热噪声,对信号注入和输出影响很大,它相当于电阻热 噪声和电容的总宽带噪声之和。

以上三种噪声是独立无关的,所以 CCD 的总噪声功率应是它们的均方和,见表 3.4。

噪声的种类	噪声电子数		
注入噪声	≈400		
转移噪声 SCCD	$\approx 1000$		
BCCD	$\approx 100$		
输出噪声	$\approx 400$		
总均方根载流子变化			
SCCD	1150		
BCCD	570		

表 3.4 CCD 的噪声

#### 7. 分辨率

分辨率是摄像器件最重要的参数之一,它是指摄像器件对物像中明暗细节的 分辨能力。测试时用专门的测试卡。目前国际上一般用 MTF(调制传递函数) 来表示分辨率。

#### 8. 动态范围与线性度

CCD 成像器件动态范围的上限决定于光敏元满阱信号容量,下限决定于摄像器件能分辨的最小信号,即等效噪声信号,故 CCD 摄像器件的动态范围定义为

等效噪声信号是指 CCD 正常工作条件下,无光信号时的总噪声,等效噪声信 号可用峰峰值、也可用均方根值表示。通常噪声的峰峰值为均方根值的 6 倍,因 此由两种值算得的动态范围也相差 6 倍。

通常CCD摄像器件光敏元的满阱容量约 10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup>电子,均方根总噪声约 10<sup>3</sup>电子数量级,故动态范围在 10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>数量级。

线性度是指在动态范围内,输出信号与曝光量的关系是否成直线关系。

通常在弱信号及接近满阱信号时,线形度较差。在弱信号时,器件噪声影响 大,信噪比低,引起一定的离散性;在接近满阱时,由于光敏元下耗尽区变窄, 使量子效率下降,灵敏度降低,所以使线性度变差。在动态范围的中间区域,非 线性度基本为零。