

电荷耦合器件(CCD)的原理及其在摄像器件中的应用

金 春 植

1. 前 言

1970年,美国贝尔实验室的 Smith 等人^[1,2]提出一种新的半导体器件——电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, 简称 CCD)概念并进行了验证。这种器件与我们熟知的靠P-N结工作的晶体管不同,是一种无结器件。

CCD的基本原理是很简单的。它是由密排MOS器件组成的。工作时在这些MOS结构的金属电极上施加适当的电压,使信号载流子(电子或空穴)存储在特定电压下的半导体表面上,通过周期地改变其电极电压,使载流子沿半导体表面传输。CCD的本质是移位寄存器。CCD的最令人感兴趣的特点正是它不仅具有存储信号的能力而且具有传输信号(自扫描)的能力。

CCD概念的提出以及所予计的广泛应用前景,引起各国半导体器件研制者的极大注意。几年来对CCD基础理论、结构设计及其应用等方面进行广泛而深入的研究,现已取得很大进展。

CCD的应用主要包括:移位寄存器,模拟延迟线,存储器,摄像器件和模拟信号处理等。本文仅就 CCD 的工作原理及其在摄像器件中的应用作一般介绍。

2. 电荷耦合器件的基本原理

2-1. MOS结构的非稳态特性^[1,3,4]

我们要分析的 MOS 结构为金属——二

氧化硅(绝缘体)——硅(*n*型半导体)结构。图1表示这种MOS结构及其表面势和表面电荷分布。当金属电极(栅极)上施加足够大的负电压时,将排斥硅表面上的多数载流子(电子),硅表面上产生耗尽层。这时在耗尽层中的电荷只是被离化的施主杂质(带正电),称这种状态为非稳态(见图1(a))。此时耗尽层最宽,表面势变化也最大。经一段时间之后,由于热激发产生的电子——空穴对中的电子(多数载流子)仍被排斥向硅体内,只有空穴(少数载流子)被吸收在硅表面,因此在硅表面形成反型层(P型),即已达到稳态(热平衡状态),由图1(b)表示。此时耗尽层宽度和表面势都变小。

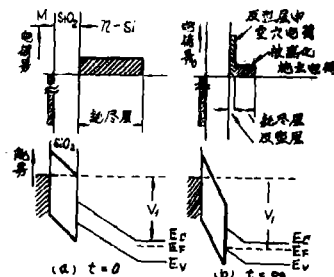


图1 表面势和表面电荷的分布(稳态)

现在我们要考虑,在金属电极上施加负电压开始($t=0$)经过多长时间之后才能达到稳态,即非稳态持续时间为多长的问题。

令, g 为在耗尽层中由于热激发产生的电子——空穴对的产生率,则 g 可近似地表示成:

$$g = n_i / 2\tau \quad (\text{cm}^{-3} \text{秒}^{-1}) \quad \dots\dots (1)$$

其中,

n_i : 本征载流子浓度;

τ : 载流子寿命。

假设经过时间 T 之后，由于热激发产生的电子——空穴对中和了耗尽层宽度为 W 中的电荷，则，

$$gTW = NW$$

$$T = N/g = 2\tau N/n_i \dots\dots\dots (2)$$

其中， N ：硅衬底的施主杂质浓度。

室温下硅有 $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，对通常半导体硅有 $N/n_i = 10^5 \sim 10^6$ ，因此即使 $\tau = 10^{-6}$ 秒， T 还是具有秒的数量级。这个非稳态持续时间 T 称为存储时间。不难看出，对 CCD 只有在这个存储时间 T 内进行信号处理才有可能辨别信号的大小。因为这种由热激发形成的反型层中的正电荷最后将同光生正信号电荷混合起来，就如同硅靶中的暗电流的影响一样，使有效图象对比度降低，甚至模糊不清。显然这种由非平衡态向平衡态过度的时间越长越好，因为这样就有充分时间积累有效信号和进行信号处理。更严格地说，在 CCD 中信号的存储和传输必须充分小于存储时间之内进行完毕，否则，CCD 就完全失去其工作能力。

为详细了解 CCD 的状况起见，我们再来考虑 MOS 结构中表面势 φ_s 和电容 C 随反型层中少数载流子电荷 Q' 而变化的情况。

φ_s 和 C 由下式表示¹⁾，

$$\begin{aligned} \varphi_s = & (V_G - V_{FB}) - \frac{Q'}{Q} (V_G - V_T) \\ & - \frac{B}{C_0} \left\{ \left[1 + \frac{2C_0(V_G - V_{FB})}{B} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \left[1 - \frac{Q'}{Q} \left(\frac{V_G - V_T}{V_G - V_{FB}} \right) \right] \right]^{1/2} - 1 \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} C = & C_0 \left\{ 1 + \frac{2C_0 V_G}{B} \times \left[1 - \frac{Q'}{Q} \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{V_G - V_T}{V_G - V_{FB}} \right) \right] \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

其中，

$C_0 (= K_0/X_0)$ ：单位面积 SiO_2 上的电容；

$Q = C_0(V_G - V_T)$ ：稳态时反型层中少

数载流子电荷密度；

$$B = K_S q N X_0 / K_0;$$

K_0, K_S ： SiO_2 和 Si 的介电常数；

X_0 ： SiO_2 厚度；

N ：硅衬底杂质浓度；

V_G ：加在金属电极上的电压；

V_T ：为形成反型层所必须加在金属电极上的最小电压；

V_{FB} ：平带电压。

表面势 φ_s ，电容 C 以及耗尽层宽度 X_d 随 Q'/Q 而变化的曲线图表示在图 2。电容 C 的变化可用来测量 Q' ，表面势 φ_s 是影响电荷存储与传输的很重要的物理量。

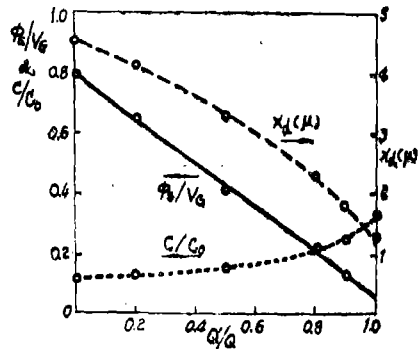


图 2 MOS 结构中耗尽层宽度 X_d ，表面势 φ_s 和电容 C 与注入电荷 Q' 的关系。

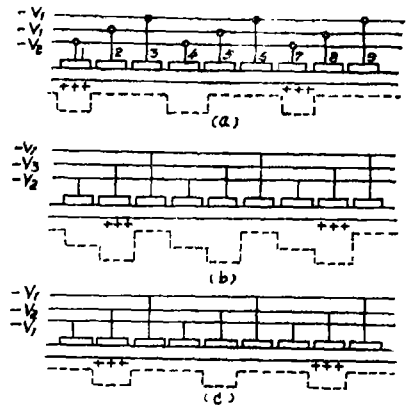


图 3 三相 CCD 结构，电荷存储和电荷传输示意图。

2—2. 电荷的存储和传输¹⁾

图 3 是最简单的 CCD 结构、电荷存储以及电荷传输的示意图。CCD 是在 N 型硅表面

上由氧化层（厚度大约为1000 Å）相隔开的密排的金属电极所构成。每隔两个电极的所有电极都接在一起，这样共有三个电极引线。

如图3(a)所示，在电极1, 4, 7, ...上施加足以产生表面反型的负电压 $-V_2$ ，其余电极上施加稍大于 V_1 的负电压 $-V_1$ ，图中用点线表示耗尽层边界。这时电极1, 4, 7...下的耗尽层最宽，表面势最深，即形成势阱。在这些势阱中可以存储少数载流子（空穴）。然后，当电极2, 5, 8...上施加更低的电压 $-V_3$ ($V_3 > V_2 > V_1$) 时，电极1下的电荷移向电压更低的电极2之下（图3(b)）。由图2可知，电荷从电极1向电极2传输时，电极1下的势阱要变深，而电极2下的势阱要变浅。为了使电极1下的电荷无保留地完全传输到电极2之下，必须适当地选择 V_2 和 V_3 的大小，以便在电荷传输的任何时刻，总是维持电极2下的势阱要深于电极1下的势阱。完成一次传输之后施加在各电极上的电压由图3(c)表示。依此类推，电荷可从电极1传输

到电极2, 3, 4... n。最后经输出二极管输出（在图中没画出输出二极管）。

为了达到传输电荷的目的，需要在各电极上周期性地施加一定的脉冲电压，我们称这种电压为时钟电压。图4表示三相CCD的时钟电压与电荷传输的关系⁵⁾。

从上面的分析中不难看出，为了让电荷向一定方向传输，必须使电荷包左右两个电极下有不对称的表面势才行。式(3)表明表面势与电极电压、绝缘层厚度以及衬底杂质浓度有关，图5表示这种关系。如果采用图5(a)的方案，只能用上面所讨论的三相结构才有可能，三相结构在工艺上有一定困难。为了减少一相可采用图5(b)和(c)的方案，这种两相结构克服了在三相结构中存在的电极引线交叉的工艺难点。

当电极间隔过宽时在氧化层下会产生势垒（参看图7(b)），使电荷不可能实现完整的传输。要使间隔做得小（小于 3μ ）又带来工艺上的困难，采用图5(c)的方案，可得到完满的解决。

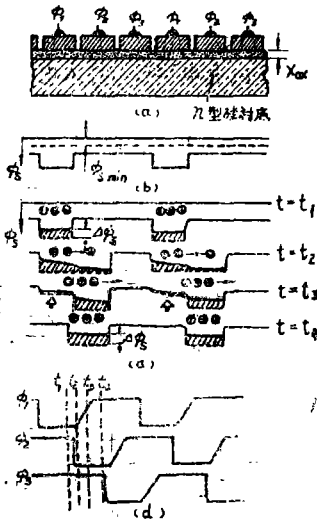


图4 三相P沟CCD时钟电压与电荷传输的关系。

- (a) CCD的横截面。
- (b) 表面势 ϕ_s （在 ϕ_1 施加脉冲电压 $-V$ ）
- (c) 由(d)所示的时间内电荷从电极 ϕ_1 下的势阱传输到电极 ϕ_2 下势阱。
- (d) 施加在栅极上的时钟脉冲电压。

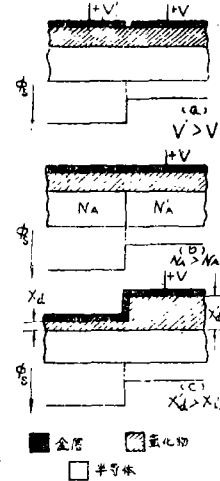


图5 MOS结构中表面势同电极电压(a)，衬底杂质浓度(b)和氧化层厚度(c)之间的关系。

2—3. 电荷传输机理

正如Smith等人¹⁾曾指出的那样，电荷从一个势阱到下一个势阱的传输机理可分为

如下三类⁶⁾: 1) 自感漂移; 2) 热扩散; 3) 边场漂移。

2—3—1. 自感漂移⁶⁾.

自感漂移是由信号电荷本身所产生的电场引起, 是一种电荷相互排斥作用。只有信号电荷大于 10^{10}cm^{-2} 时才起作用, 大约信号电荷的99%是靠这种机理传输, 它的传输速度也是很快的。待传输电荷总量 N_{tot} 随时间衰减的表达式为:

$$N_{tot}(t) = \frac{N_{tot}(0)t_0}{t + t_0} \dots (5)$$

其中, $t_0 = \frac{L^2 C_0}{1.57 \mu q n_0}$;

L = 电极中心间距;

C_0 = 单位面积 SiO_2 电容;

μ = 电荷迁移率;

q = 电子电荷量;

n_0 = 初始电荷面密度。

自感应电场在电荷传输方向 (y 方向) 上的大小由下式给出,

$$E_E(y) = 1.8 \times 10^8 \left(\frac{n_0}{10^{11}} \right) S \left(\frac{y}{L}, \frac{2X_0}{L} \right) \dots \dots \dots (6)$$

通常函数 S 的最大值为 $4 \sim 5$ (对 $2X_0/L = 0.1$)。令 $S = 4$, 则(6)式可简化成:

$$E_{x_{max}} \cong 7.2 \times 10^8 \left(\frac{n_0}{10^{11}} \right) \text{V/cm} \dots \dots \dots (7)$$

这就是最大自感应电场大小与电荷密度之间的简单又近似的表达式。

2—3—2. 热扩散⁶⁾.

通过自感漂移传输之后留下的小部分电荷要靠热扩散传输。经热扩散时间 t 之后残留在原电荷所在电极下的载流子总量 N_{tot} (t)为:

$$N_{tot}(t) = \frac{8}{\pi^2} N_{tot}(0) \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right) \dots \dots \dots (8)$$

其中, D 为扩散常数。可见, 电荷以指数式

衰减, 其衰减时间常数为:

$$\tau_{th} = \frac{4L^2}{\pi^2 D} = \frac{L^2}{2.5D} \dots \dots (9)$$

在单靠热扩散传输的情况下, 每周期要传输99.99%的电荷所需要的时钟频率 f_{th} 为⁵⁾:

$$f_{th} = \frac{5.6 \times 10^7}{L^2} (\text{HZ}) \dots \dots (10)$$

这里取 $D = 6.75$, L 以 μm 为单位。

2—3—3. 边场漂移⁷⁾.

电荷的存储与传输, 不仅受它上方电极电压的影响, 同时受邻近电极电压的影响。由外加电压所引起的电场方向, 原则上与电荷传输方向垂直, 但同时存在与电荷传输方向平行的电场。我们所指的边场就是指这个平行于电荷移动方向的电场。实际上, 在电极下表面势的分布并不象由图6(a)所表示的那样直角形分布, 而是由图6(b)所表示的那样, 表面势的分布是平滑的, 因此在电荷移动的方向上有电位梯度——电场。这个电场起加快电荷传输速度的作用, 它又是确定电荷移动方向的主要因素。边场的大小在电极中部为最小, 其表达式为:

$$E_{min} = 6.5 \frac{X_{ox}}{L} \frac{V}{L} \left[\frac{5X_d/L}{5X_d/L + 1} \right]^4 \dots \dots \dots (11)$$

式中, X_{ox} : 氧化膜厚度;

L : 电极中心间距;

X_d : 耗尽层宽度;

V : $\frac{1}{2}$ 总脉冲电压。

由式(11)可见, 边场的大小随氧化膜厚度和电极电压的增加而增加, 随电极长度和衬底杂质浓度的增加而减小。在边场作用下, 残留电荷将按照由下式表示的衰减时间常数 τ_i 以指数式衰减⁵⁾:

$$\tau_i = \frac{L^3}{20\mu X_{ox} V} \left[\frac{5X_d/L + 1}{5X_d/L} \right]^4 \dots \dots \dots (12)$$

其中, V : 时钟脉冲电压;

X_d : 电极下耗尽层厚度。

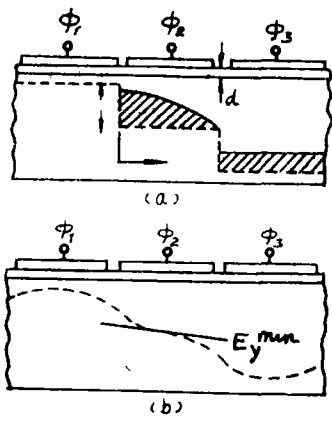


图6 三相CCD表面势分布⁸⁾: (a)直角形分布(b)实际分布。

2-4. 电荷传输损失

信号电荷不可能 100% 地从一个势阱传输到下一个势阱,而总有一部分损失掉,被传输的电荷量在原信号电荷量中所占的份额定义为传输效率,用 η 表示。残留的电荷在原电荷量中所占的份额定义为传输失效率,用 ϵ 表示之。因此有 $\eta + \epsilon = 1$ 。

总的电荷传输次数取决于 η 的大小, η 在 CCD 中是一个最重要的特性参量之一。

设,待传输电荷包的大小为 P_0 ,经 n 次传输后的大小为 P_n ,则,

$$P_n = P_0 \eta^n = P_0 (1 - \epsilon)^n \cong P_0 (1 - n\epsilon), (\epsilon \ll 1 \text{ 时}) \dots (13)$$

由此可见,对多次传输的 CCD,必须有一个很小的 ϵ 值。例如,在三相 330 单元移位寄存器中,如果要做到总的传输损失为 10%,即 $n\epsilon = 0.1$,则,要求 $\epsilon < 10^{-4}$ 或 $\eta = 99.99\%$ 。

对 CCD,影响电荷传输的因素有两个,第一,电荷从一个势阱传输到下一个势阱需用一定的时间⁶⁾;第二,Si-SiO₂ 界面态对电荷的捕获作用⁹⁾。第一个因素限制器件的频率特性。

2-4-1. 传输速度对传输效率的影响

虽然在自感电场的作用之下很快实现 99% 的电荷传输。但正如前面所举的例子那样,对需要多次传输的器件(如电荷耦合摄像器件),只有 99% 的传输效率是远远不够

的。因此,在热扩散和边场的作用之下剩余小部分电荷的传输速度显得尤为重要。实际上,电荷传输效率主要取决于热扩散和边场作用。

从电荷传输的三种机理中可以看出,电荷传输需用一定时间。另一方面,时钟频率又确定电荷传输时间。如果由频率所确定的电荷传输时间大于或接近电荷传输所需用的时间,那么从理论上可以完全忽略传输速度对传输效率的影响,但实际上这是不可能的。因为在实际应用中总是要求器件在高频下工作(如,CCD 摄像器件要求几兆到十兆赫的频率)。这样的高频所确定的电荷传输时间往往小于电荷传输本身所需用的时间。因此要获得高的传输效率必须加快传输速度。在热扩散和边场漂移传输机构中,信号电荷都是以指数式衰减,衰减时间常数越小传输速度就越快。因此对给定的时钟频率,电荷衰减时间常数的大小就成为影响电荷传输效率的主要因素。

从前面给出的衰减时间常数的表达式(9)和(12)得知:热扩散衰减时间常数 τ_d 的大小正比于 L^2 ,而边场漂移衰减时间常数 τ_f 的大小正比于 L^0 。由此可见,就缩小电极长度对加快电荷传输速度的影响而言边场更为明显。

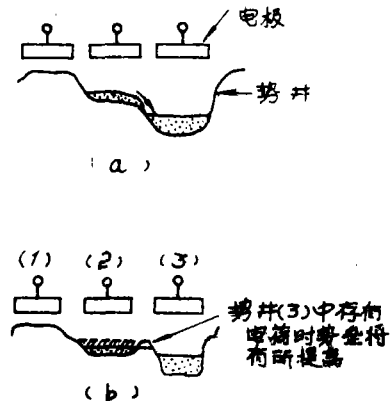


图7 两种电荷传输模型¹⁰⁾。

- (a) 完全传输模型
- (b) 非完全传输模型

在上面的讨论中，实际上我们已经假定了在势阱之间不存在势垒，即在完全传输模型(图7(a))的条件下进行了分析。如果在势阱之间存在势垒，即在非完全传输模型(图7(b))的条件下势必产生进一步的传输损失。

2-4-2. 界面态对传输损失的影响

在势阱之间不存在势垒的完全传输模型的情况下，由于界面态对电荷的捕获作用，仍引起传输损失。当电荷包沿器件表面通过时，它几乎是立即填满界面态，然而，当它继续运动时，这些界面态又会把捕获的电荷再发射出来，慢慢地变空。从界面态释放的部分电荷将返回到原来的电荷包里，但其余部分将进入尾随包里，于是增加了传输损失。图8表示这一过程的示意图。

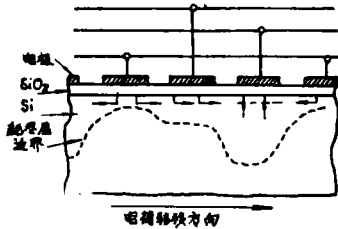


图8 三相CCD的界面态捕获作用

界面态的填满时间常数 T_f 和变空时间常数 T_e 是不同的。前者只取决于电荷密度 (n_s)，后者随界面态能级 E (从导带底算起) 呈指数变化。它们之间的关系由下式给出⁹⁾：

$$T_f = (k_1 n_s)^{-1} \dots\dots\dots (14)$$

$$T_e = (k_2)^{-1} e^{E/kT} \dots\dots\dots (15)$$

其中，

k_1 : 界面态横截面同少数载流子与表面相遇频率之积；

k_2 : 被捕获电子的逸出频率。

对给定的能量范围，如果 T_e 比所考虑的电荷包的传输时间短，那么在该范围内捕获载流子的大多数会重新被释放出来，并随

同主包传输。但 T_e 同传输时间可比拟时，只有部分加到主包上，而另一部分进入下一个包里。因而 $T_e = 1/mf_0$ 是衡量界面态对传输损失影响大小的重要条件， m 为相数。由(15)式可得出与此相对应的界面态能级 E_i ，即

$$T_e = 1/mf_0 = (k_2)^{-1} e^{E_i/kT}$$

$$E_i = kT \ln(k_2/mf_0) \dots\dots\dots (16)$$

因此，当界面态能级 $E < E_i$ 时，释放出来的大部分载流子将随同主包传输，当 $E = E_i$ 时，被释放的部分载流子进入下一个包里，引起传输损失。对 $m = 3$ ， $f_0 = 1$ 兆赫的条件下由式(16)可求得 $E_i = 0.2 \sim 0.3 eV$ (式中 $k_2 = 10^{14} \text{秒}^{-1}$)。

在 CCD 中可以引进背景电荷来减少界面态对电荷传输损失的影响。由于背景电荷填满了界面态，使信号电荷再不能被界面态所捕获，因此减少了传输损失。填满界面态的背景电荷叫做“fat zero”。在寄存器中背景电荷是用电的方法由输入二极管引进，在摄像器件中是用均匀偏置照明方法引进。“fat zero”法会带来器件动态范围的减小，因此背景电荷的大小通常不得超过满阱电荷量的 10~30%。采用“fat zero”法之后，对应于快界面态的传输损失份额可由下式表示⁵⁾，

$$\epsilon_s = \frac{1}{\frac{n_{s,0}}{n_s} + 1} kTN_{ss} \ln$$

$$\left(1 + \frac{2f}{k_1 n_{s,0}}\right) \dots\dots\dots (17)$$

式中， $n_{s,0}$: fat zero 电荷密度；

n_s : 信号电荷 (电荷/cm²)；

k_T : 室温下有 0.026eV；

× × ×

* 有人把“fat zero”译成胖“零”¹²⁾，或“富零”¹³⁾。

N_{ss} : 快界面态密度 (态/cm²eV)；

f : 时钟频率；

k_1 : 依赖于捕获横截面的常数
($\sim 10^{-2} \text{cm}^2/\text{秒}$);

背景电荷法对减少电极下的界面态对信号电荷的捕获作用是很有效的。但一个满的电荷包向电极边缘扩展, 因此被扩展面积上的界面态仍可捕获信号载流子¹⁴⁾。

我们在上面所讨论的器件是表面沟道电荷耦合器件 (SCCD)。1972年由 Walden 等人¹⁵⁾ 提出埋道电荷耦合器件 (BCCD)。BCCD 与 SCCD 不同, 其传输沟道不在表面而是在体内。因而基本上消除了表面陷井 (表面态) 对载流子的捕获作用, 半导体体内的陷井又远小于表面陷井, 因此提高了传输效率。提高传输效率的其他两个原因就是: 在 BCCD 中边场和载流子迁移率大于 SCCD。

但美中不足的是 BCCD 的信号存储能力小于 SCCD。

2-5. 噪声¹⁶⁾

在 CCD 中除传输效率外, 噪声也是一个重要的特性参量, 特别是对成像器件更为重要, 因为它决定器件的灵敏度和分辨率, 影响器件的动态范围和图象失真程度。根据大量的分析和实验结果以及器件的不断更新表明, CCD 是一种低噪声器件。CCD 之所以能用于微光成像器件, 其原因也就是它所特有的低噪声特性。

CCD 中的噪声大体由三个方面引起:

1) 输入线路, 2) 寄存器本身, 3) 输出线路, 详见表 I。

表 I CCD 的噪声源*

| 种 类 | 噪 声 源 | \bar{N} (推 导 式) | \bar{N} (典 型 值) |
|---------|--------------|--|--|
| 输入电路 | 进入第一个势井的电荷涨落 | $\bar{N}_a = 400(C_{P1})^{1/2}$ | $\bar{N}_a = 40$ 对 $C_{P1} = 0.01$ (电“fat-zero”) |
| 寄 存 器 | 传输过程 | $\bar{N}_a = (2\epsilon N_g(N_S + N_{FZ}))^{1/2}$ | $\bar{N}_a > 200$ 对 $\epsilon N_g = 0.2$ |
| | 捕获损失 | $\bar{N}_a = (1.4kTN_{SS}N_gA_g)^{1/2}$ | $\bar{N}_a = 950$ 对 20^0 次传输 ($N_{SS} = 10^{10}/\text{cm}^2/\text{ev}$) |
| 存 储 过 程 | 热生暗流的散粒噪声 | $\bar{N}_a = N_d^{1/2}$ 其中 $N_d = \frac{I_d A_g P T}{q}$ | $\bar{N}_a = 56$ 对 $N_d = 3120$ 其中 $I_d = 10 \text{nA}/\text{cm}^2$ |
| | 光生背景信号的散粒噪声 | $\bar{N}_a = N_{FZ}^{1/2}$ 其中 $N_{FZ} = 1/10$ 满井 | $\bar{N}_a = 316$ 对 $N_{FZ} = 10^5$ (光“fat-zero”) |
| 输出电路 | 外接放大器 | $\bar{N}_a = 400(C_{P1})^{1/2}$ | $\bar{N}_a = 1300$ 对 $C_{P1} = 10 \text{PF}$ $\bar{N}_a = 130$ 对 $C_{P1} = 0.1 \text{PF}$ |

* C_{P1} = 每势井电容 (PF); ϵ = 传输效率; N_g = 传输次数; N_S = 每电荷包信号载流子数;

N_{FZ} = 每电荷包中背景载流子 (“fat-zero”) 数; A_g = 单个栅面积; P = 相数;

N_d = 每电荷包中来自热生暗流的载流子数; 表中的 \bar{N}_a 值 (用载流子数表示) 是对一个扫描周期计算的 ($T = 1/60$ 秒)。

上述噪声可称做统计噪声, 除此之外还有固定图案噪声。这种噪声主要来自各单元之间的暗流、灵敏度以及几何尺寸的不一致性。

对成像器件影响最大的噪声源来自捕获噪声, 这是表面沟道 CCD 致命的弱点。为了降低捕获噪声可改用埋道 CCD, 这种器件基本上不受界面态影响, 因此减少了捕获

噪声。同时, 由于这种结构具有较大的边场以及载流子迁移率, 提高了传输效率, 因此不再需要光“fat zero”, 从而又消除了由光生背景电荷引起的散粒噪声。

降低热噪声 (热生暗流的散粒噪声) 是较麻烦的事情, 因为它需要冷却。每降低 10°C 时其噪声将减少 $\sqrt{2}$ 倍。有时固定图案噪声甚至大于热噪声。

把放大器置于同一基片上会降低输出线路噪声。浮置扩散放大器就是其中的一个例子。

3. 电荷耦合摄像器件

CCD 具有光电转换, 信号存储以及信号传输(自扫描)的能力。因此很适合研制一种崭新的全固体自扫描摄像器件。与摄像管比起来有如下几个优点: 1). 小型重量轻; 2). 低压功耗小; 3). 寿命长; 4). 无图象畸变; 5). 无残象; 6). 可用于微光摄像等优点。

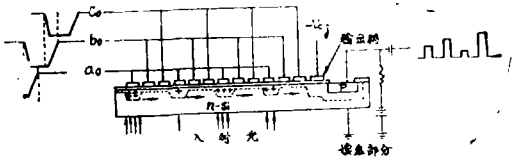


图9 三相CCD摄像器件信号的存储与传输

图9是CCD摄像器件的简图。在CCD摄像器件中, 停止时钟脉冲时形成固定的势阱, 当光照射到CCD表面时, 由于光子的作用在硅中产生电子——空穴对。其中少数载流子被收集在硅表面的势阱中, 而多数载流子迁往硅体内。收集在势阱内的电荷包的大小正好与入射光信号的大小成比例, 即光信号变成了电信号。当施加时钟脉冲时, 每个信号电荷包将移向输出二极管, 做为视频信号而输出。

把光电存储 CCD 直接用于信号的传输时, 由于在传输过程中继续光照而产生电子——空穴对, 使信号电荷发生重迭, 在显示器中出现模糊现象。因此在 CCD 摄像器件中有必要把摄像区和传输区分开, 或者做到使传输时间远小于摄像时间。当设计摄像器件的结构时必须充分考虑这一点。

3-1. 结构及工作原理¹⁸⁻²⁰⁾

CCD摄像器件可分为线器件和面器件。图10是各种线器件结构的示意图。由图10(a)表示的结构中摄像和传输是在同一个

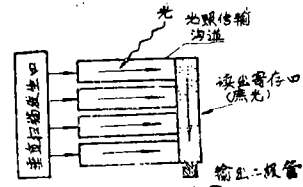
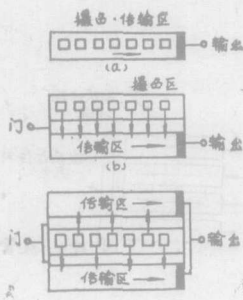


图10 线CCD摄像器件的结构。

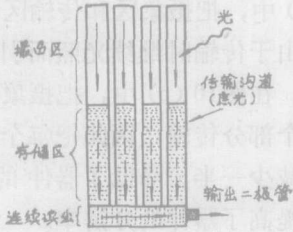
CCD中进行, 这种结构带来图象模糊现象。在图10(b)中, 把摄像区和传输区分开, 它避免了由于传输时继续光照而引起的图象模糊现象。在图10(c)中, 把摄像区中的信号分成两个部分传输, 因此把每个电荷包的传输次数减少一半, 降低了器件的传输损失, 进而提高了器件的分辨率。

图11是各种面器件的示意图。图11(a)表示线寻址结构, 它是由图10(a)所示线器件的排列而成, 只不过用垂直扫描发生器进行逐行起动(线寻址), 把信号送到读出寄存器, 最后通过寄存器上的输出二极管输出其视频信号。在这种结构中, 摄像和传输是在同一个CCD中进行, 因而与图10(a)结构一样, 出现图象模糊现象。但是, 对每行具有M个象素, 总象素数为 $M \times N$ 的器件, 其每一行的传输时间为 $\frac{1}{N}$ 帧时间, 因此在显示图象中基本上看不到模糊现象。另一方面, 在这种结构中各行的电荷包在读出寄存器中所通过的单元数是各不相同的, 因此在实际应用中必须考虑各行的读出开始时间。

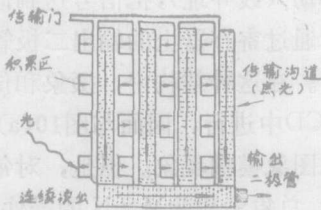
图11(b)表示帧传输结构。在这种结构中, 收集在摄像区中的光生电荷图象是一齐传输到具有与摄像区同样单元数的存储区, 即实现帧传输。当这一传输结束时, 摄像区再次开始收集光生电荷。与此同时, 已传输到存储区中的电荷图象是一行一行向读出寄存器传输, 最后, 通过寄存器末端的二极管输出视频信号。读完存储区中的所有信号电荷之后, 再开始由摄像区到存储区的传输, 此后, 重复进行上述传输过程。



(a) 线寻址结构



(b) 帧传输结构



(c) 行间传输结构

图11 面CCD摄像器件的结构。

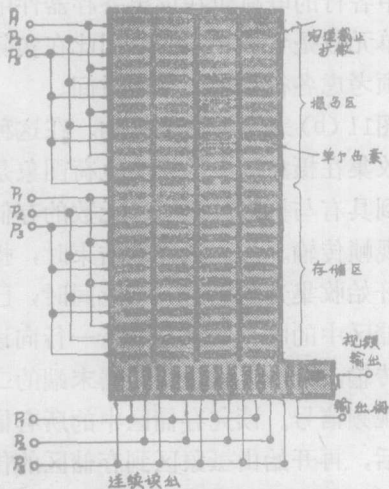


图12 帧传输结构的详细电极图^[21]。

在帧传输结构中，由于附加一个存储区，增加了整个器件面积。但正如图12所示，在水平方向具有共同的电极，因此大大简化了电极结构，并容易实现隔行扫描。正如下节所述，利用隔行扫描可减少一半垂直方向的象素数而不影响图象分辨率。对于水平方向具有M个象素的帧传输器件，如果在电视图象中需要M×N个象素的分辨率时，在摄像区和存储区中的总单元数为M×N个就可以了。

由于帧传输期间的继续光照会产生图象模糊现象。因此为了尽量消除这种现象，必须加快帧传输速度。通常，帧传输速度与视频输出速度相比要慢4~8倍，即帧传输时间 T_t 相当于几行的时间。在这个时间 T_t 内，由于传输时的继续光照所产生的电荷将分布在 $\frac{N}{2}$ 个行中（为方便起见，以下用 n 代替 $\frac{N}{2}$ ），因此在帧传输时间 T_t 内，每个电荷包 Q_p （在帧时间 T_t 内所能收集到的每个象素内的电荷量 $P=1, 2, \dots, n$ ）所失去的电荷量为 $\frac{T_t}{T_f} Q_p$ （ $P=1, 2, \dots, n$ ）。同时，每个电荷包从其余所有电荷包中所得到的电荷量为：

$$\sum_{p=1}^n \frac{1}{n} \frac{T_t}{T_f} Q_p = \frac{T_t}{T_f} Q_n \dots (18)$$

式中， $Q_n = \frac{1}{n} (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)$ ，即 Q_n 为平均电荷包电荷量。由此可见，每个电荷包所得到的净电荷量为*：

$$\frac{T_t}{T_f} Q_n - \frac{T_t}{T_f} Q_p = \frac{T_t}{T_f} (Q_n - Q_p) \dots (19)$$

其中， $P=1, 2, \dots, n$

× × ×

* 文章[19,20]指出，传输期间继续光照对每个电荷包的影响是相同。笔者认为这一结论是错误的。

在一般光照情况下，可以忽略这个量对

图象的影响。

帧传输器件是由摄象区，存储区和读出区三个部分组成，各区都有一组独立的时钟脉冲系统，其中读出区的传输速度为最快。

图11(c)表示行间传输结构，摄象区位于存储区之间的一种帧传输结构。实际上，它是由图10(b)所示线器件的排列而成。这种器件的帧传输是在水平方向上仅作一次传输来实现。

为了防止图象模糊现象全部存储区是光屏蔽的。因此其灵敏度受到损失。但是由于起动简单，当器件设计时有较大的自由度，因此可采用较复杂的器件结构。

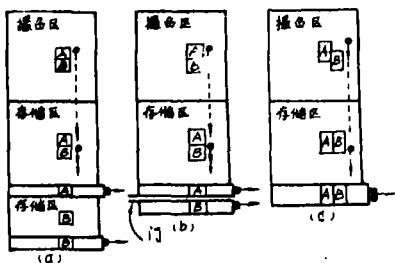


图13 帧传输结构中隔行扫描的三种方法²²⁾。

(a)附加存储 (b)丢失一行 (c)行间混合

2—3 隔行扫描^{20, 22)}。

标准电视必须进行隔行扫描。对线寻址结构(图11(a))和行间传输结构(图11(c))，容易做到隔行扫描。在线寻址结构中，垂直扫描系统对器件进行隔行起动即可。在行间传输结构中，设置两个传输门，各门对应各场即可。在帧传输结构(图11(b))中，由于整个电荷图象是同时移动，因此直接进行隔行扫描是不可能的。

图13表示在帧传输结构中进行隔行扫描的三种方法。图13(a)是附加一个具有原存储区一半大小的存储区，暂时存储第二场的B信号，以便在通过原读出寄存器将第一场的A信号读完之后经第二个读出寄存器输出B信号，从而实现隔行扫描。这种方法的缺点在于：增加了器件面积，并使第一读出寄

存器的电极结构复杂化了。

在图13(b)表示的方法中，把来自第二行的B信号通过第二个读出寄存器消除掉(或者通过沿第一读出寄存器设置的漏二极管而消除)。当进行第二场扫描时，与第一场情况相反把A信号消除掉，这样也实现了隔行传输。这种方法的缺点是会降低一半灵敏度。

图13(c)表示行间混合方法(即相临行混合方法)，在这个方法中，用电的方法移动光生电荷的收集中心来实现隔行扫描。例如，对两相CCD首先在 ϕ_1 电极下(图中用A表示的位置)存储信号电荷，实现奇数场的信号输出。然后，在 ϕ_2 电极下(图中用B表示的位置)存储信号电荷，实现偶数场的信号输出。这里，在两场之间的电荷收集中心是错开了半个像素距离。因此不增加器件像素数的情况之下，使垂直方向的分辨率提高两倍。当然，这种方法同样可以用于三相CCD中。用A/B表示三相器件中各种行间混合方法。其中A表示奇数场的第A电极，B表示偶数场的第B电极。则，共有如下几种行间混合方法： $1/2$ 、 $1/2+3$ 、 $1/2/1/3$ 等。

$1/2$ ：奇数场信号存储于1电极下，偶数场信号存储于2电极下。

$1/2+3$ ：奇数场信号存储于1电极下，偶数场信号存储于2和3电极下。

$1/2/1/3$ ：第1帧第1场信号存储于1电极下，第一帧第二场信号存储于2电极下，第2帧第3场信号存储于1电极下，第2帧第4场信号存储于3电极下，以下重复上述过程，因此叫做双隔行扫描。不难看出，偶数场的信号收集中心将是电极2和3的中心位置。

在这些隔行扫描方法中 $1/2+3$ 方法为最佳。

3—3. 性能

3—3—1. 暗电流⁽²³⁾⁽²⁴⁾

CCD是一种动态存储器，其存储时间为

秒的数量级，这是因为除信号之外来自暗流的电荷将填满势阱的缘故。暗流的大小与存储时间的关系表示在图14。

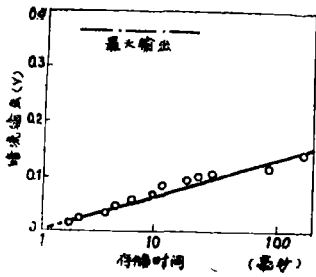


图14 暗流特性²⁴⁾。

暗流的产生机构主要有三个：1). 来自硅衬底的扩散电流 $I_{d,i}$ ；2). 来自耗尽层的产生电流 $I_{d,p}$ ；3). 来自界面态的产生电流 I_s 。其中硅衬底的扩散电流 $I_{d,i}$ 很小可忽略，因此总的暗流由下式表示，

$$I_d = I_{d,p} + I_s \dots\dots\dots (20)$$

$I_{d,p}$ 和 I_s 分别由下列方程给出，

$$I_{d,p} = gNiW/2\tau \dots\dots\dots (21)$$

$$I_s = qNiS/2 \dots\dots\dots (22)$$

其中，

- q：电子电荷量；
- N_i ：本征载流子浓度；
- W：耗尽层宽度；
- τ ：有效寿命；
- S：有效界面产生速度。

在CCD中暗流大约为 $5nA/cm^2$ ，对具有 512×320 像素的SCCD面摄像器件，在1兆赫时钟频率下，其暗流大约为 $4nA$ 。暗流的大小受 N_i 随温度变化的影响。

除上述产生暗流的三个来源之外，做为流入势阱的电荷还有其他两个来源。其中之一是当沟道截止扩散层的阈值电压不高时引起的漏电流将流进势阱，另一个是当氧化层中存在缺陷时，被存储的信号电荷将流往电极的所谓负暗流作用。

在室温下可做到暗流小于 $5nA/cm^2$ ，但

有时在局部位置其暗流高达几百个 nA/cm^2 。认为这主要来自原始硅晶体本身和工艺过程带来的缺陷。CCD是一种具有较大工作面积的器件，因此要消除晶体缺陷是提高成品率的一个重要环节。

3—3—2 灵敏度

在CCD成象器件中，光可以正面入射或背面入射。在正面入射结构中，由于电极—氧化物界面的反射，多晶硅电极的吸收以及光屏蔽传输寄存器带来的光的损失，使器件的实际量子效率小于1。因此在具有任何几何因素修正值的对应条件下，CCD摄像器件基本上与任何其他硅器件有相同的光灵敏度。不管采用正面入射或背面入射结构的那一种，其光灵敏度总是比较低，用透明电极结构会改善光灵敏度。

由于CCD的输出电容可以小到 $0.1PF$ ，因此有较好的信噪比。

在CCD摄像器件中，最大信号（饱和信号）大小与最小可探测信号大小之比叫做动态范围。用现在的工艺水平可做出动态范围为 $1000:1$ 的器件。

3—3—3. 分辨率²⁵⁾。

为了获得预期的分辨率，器件必须具有相应的像素数。例如，为了满足标准广播电视分辨率，器件必须具有 512×680 像素（隔行扫描）。但这并不是充分条件，实际上在CCD摄像器件中所观察到的分辨率要低于像素数所限定的最高分辨率。取样效果，硅中电荷的横向扩散，暗流的不均匀性，时钟瞬变过程以及信号传输时继续光照等都是降低分辨率的因素。但传输损失将是限制器件最高分辨率的最基本的因素。通常用传输次数 n 和传输失效率 ϵ 的乘积 $n\epsilon$ 来表示传输损失的大小。为了获得预期的空间分辨率，在垂直方向和水平方向两个寄存器的 $n\epsilon$ 乘积应当做的很小（如 $n\epsilon = 0.1$ ）。

表II示出在三相垂直帧传输CCD摄像器件中，对给定的像素数和 $n\epsilon$ 值，最大可容许传输失效率的计算值。

表 I 三相CCD垂直帧传输摄像器件的最大可容许传输失效率

| 单元数 (垂直×水平) | 最大传输次数 (n) | 传输失效率 ϵ | |
|------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | 对 $n\epsilon=0.1$ (MTF=82%) | 对 $n\epsilon=0.3$ (MTF=55%) |
| 45×60 (90×60 隔行扫描) | 450 | 2.2×10^{-4} | 6.6×10^{-4} |
| 64×106 (128×106 隔行扫描) | 702 | 1.4×10^{-4} | 4.2×10^{-4} |
| 128×160 (256×160 隔行扫描) | 1248 | 8×10^{-5} | 2.4×10^{-4} |
| 256×320 (512×320 隔行扫描) | 2496 | 4×10^{-5} | 1.2×10^{-4} |
| 256×680 (512×680 隔行扫描) | 3576 | 2.8×10^{-5} | 8.4×10^{-5} |
| 4500×6000 (隔行扫描) | 31500 | 3.2×10^{-6} | 9.5×10^{-6} |

3—3—4. 图象缺陷^{20,26)}.

CCD中的微观缺陷会在显示象中产生宏观效应。硅晶体中的电荷产生中心会引起暗流尖峰，因此在显示象中相应地将带来白点或亮线（在图15中用2和3表示）。沟道截止扩散横跨传输区或氧化膜中的针孔会引起沟道截止，因此在显示象中将带来黑区和黑线（在图15中用1和4,5表示）。从图15可见，随器件中微观缺陷所在位置的不同，在显示象中产生的宏观效应也不同。在读出寄存器中的沟道截止对器件的影响最为明显。

最近白木报导²⁷⁾，由氧化引起的层错及其变形会带来白斑，并指出器件背面的磷扩

散吸收将明显消除这些白斑。

认为在CCD的制备工艺中采用近年发展起来的HCl^{28,29)}或TCE^{30,31)}氧化工艺会

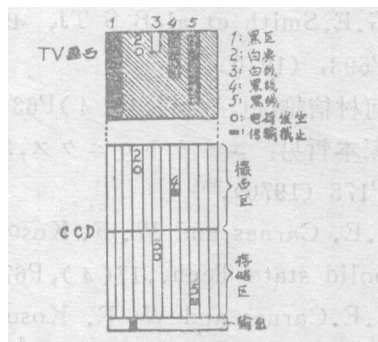


图15 帧传输结构摄像器件的缺陷和TV图象缺陷的相互关系²⁶⁾.

表 II 国外CCD面摄像器件研制进展一览表

| 厂 | 象素数 (垂直×水平) | 相数 (ϕ) | 沟道 S:SCCD B:BCCD | 传输结构 F:帧传输 IL:行间传输 LA:线寻址 | 隔行扫描 |
|-----|----------------|------------------|------------------------|------------------------------------|---------|
| BTL | 496×475 | 3 | S | F | 1/2+3 |
| RCA | 512×320 | 3 | S | F | 1/2+3 |
| FC | 488×380 | 2 | B | IL | 1/2 |
| TI | 400×400 | 3 | B | LA | |
| 东芝 | 368×176 | 4 | S | F | 1+2/3+4 |
| 日电 | 242×228 | 4 | S | F | 1+3/2+4 |

改善器件性能(如暗流和噪声)。

在CCD摄像器件中同硅靶摄像管一样,出现开花(blooming)现象。在局部强光的照射下,光生载流子填满相应的势井之后溢出的过剩载流子将沿沟道流进相邻的势井,于是在显示象中产生明亮的线。为了防止这种开花现象,由贝尔实验室的Séquin提出³²⁾,在沟道间设置溢漏极(overflow drain),收集由满井溢出的过剩载流子,以免它们流进相邻的势井中,从而防止了开花现象。

表Ⅲ列出了美国和日本研制面 CCD 摄像器件的进展情况。由贝尔实验室(BTL)、美国无线电公司(RCA)和仙童公司(FC)研制的CCD摄像器件已接近标准电视水平。

完成初稿之后由贾欣志同志做了修改补充,在编写过程中曾与贾欣志、杨晓文两位同志进行了有意义的讨论,对此表示谢意。

参 考 文 献

- 1) W.S.Boyle and G. E. Smith:BSTJ, 49(4), P589 (1970).
- 2) G.E.Smith et al; B S T J, 49(4), P593, (1970).
- 3) 河村信雄; 电子材料, 10(4)P63(1971).
- 4) 冢本哲男: エレクトロニクス, 21(2), P178 (1976).
- 5) J.E. Carnes and W. F. Kosonocky; Solid state Tech., 17(4), P67(1974)
- 6) J.E.Carnes and W. F. Kosonocky; IEEE, ED—19(6), P798(1972).
- 7) J.E.Carnes et al; IEEE, SC—6(5), P322 (1971).
- 8) 冢本哲男: エレクトロニクス, 21(7), P694(1976).
- 9) J.E.Carnes; Appl. Phys. Lett., 20(7), P261(1972).
- 10) 冢本哲男: エレクトロニクス, 21(3), P288 (1976).
- 11) M.F.Tompsett; J. Vac. Sci. Tech., 9(4), P1166(1972)
- 12) 谢希德: 国外电荷耦合器件, 1976年, 第1页。
- 13) 杨先敏: 光学精密机械(内部), 1977年第一期。
- 14) M.F.Tompsett; IEEE, ED—20(1), P45(1973).
- 15) R.H.Walden et al; B S T J, 51(7), P1635(1972).
- 16) P.K. Weimer; advance in EEP, 37, P221(1975).
- 17) 伊吹顺章: エレクトロニクス, 19(2), P255 (1974).
- 18) 大场信弥等: 电子材料, 13(2), P40 (1974).
- 19) C.H.Séquin; NATO adv. study ser. E, №.16, P261 (1976).
- 20) 冢本哲男: エレクトロニクス, 22(4), P365 (1977).
- 21) M. F. Tompsett et al; Electronics, 46(2)P162 (1973).
- 22) C. H. Séquin; IEEE, ED—20(6), P535 (1973).
- 23) 冢本哲男: エレクトロニクス, 21(12), P1118 (1976).
- 24) 锅岛大树: 画像技术, 6(12), P23(1975)
- 25) 参考文献16), P237.
- 26) C. H. Séquin et al; IEEE, ED—20(3), P244 (1973).
- 27) H.Shiraki; Japan. J. appl. phys., 16(4), P585 (1977).
- 28) R.J. Kriegler et al; J. Electrochem. Soc., 119(3), P388 (1972).
- 29) 棚桥强司等: 半导体·集积回路技术——第5回シンポジウム(昭和48年), P37.
- 30) T.Hattori; J. Electrochem. Soc. 123(6), P945 (1976).
- 31) 服部毅: 半导体·集积回路技术——第8回シンポジウム(昭和50年), P19.
- 32) C. H. Séquin; B S T J, 51(8), P1923 (1972).