

# 锋芒初露的 CCD

孟烈 王锋

CCD 是电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device) 的简称。它是大规模集成电路的一个后起之秀, 甚至有人称之为第五代电子器件。

该器件工作原理不同于常规的控制电流的半导体器件, 它是靠电荷耦合作用来实现逻辑和模拟功能的, 因而得名。

由于它制造工艺简单, 集成度很高, 可作成容量极大的存贮器, 受到计算机界的普遍重视; 又因为它可用作高速模拟移位寄存器, 给停步不前的高速单次信号取样分析开辟了崭新的途径, 引起电子学界很大兴趣; 特别是它可用作图象传感器, 使光学摄影系统发生了很大变革, 给科研、生产和国防建设带来了许多方便和益处。近几年来, 它也受到高能物理和核物理实验工作者的重视, 把它引入到探测器中来, 改善探测器的性能。

本文在简述 CCD 基本原理的基础上, 介绍它在高能物理探测器等方面的应用。

## 一、器件工作原理

在 P 型硅上生成一薄层  $\text{SiO}_2$ , 在此层上再蒸镀一层铝。然后把铝层光刻成间距很小的栅电极 (图 1 中的 1、2、3、4、5 和 6 都是栅电极)。当在栅电极上加正电压时, 在它下面的 P 型硅表面形成耗尽层 (也叫势阱)。

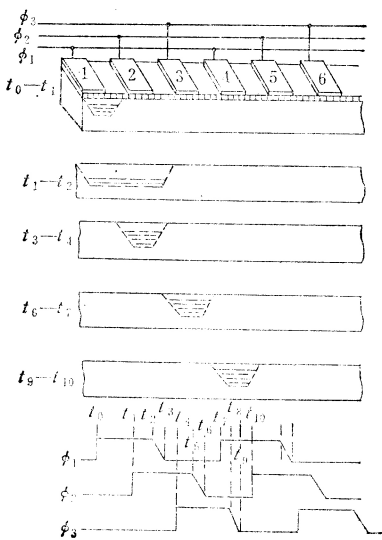


图 1

所加电压越高, 耗尽层就越深。负电荷一旦落入势阱中, 就被俘获, 这样, 势阱就可存贮电荷。当在相邻两电极上都加正电压时, 因电极间间距很小, 所以它们下面的势阱就交叠在一起; 这样原存在

其中一个里的电荷就可能流入另一个里面去。这正如两个连通的水井一样, 只要另一水井更深的话, 浅井中的水就会全部流入深井中去。如上所述, 通过适当地控制栅电极上的电位, 就有可能实现电荷的耦合和传递。

当把相位上相互有一定延迟的三个时钟脉冲如图 1 所示的那样加到各电极上时, 就可实现电荷的转移, 其工作过程如下:

如在加时钟脉冲  $\phi_1$  时, 在势阱 1 中注入电荷, 则在  $t_0-t_1$  期间, 电荷就存于势阱 1 中; 在  $t_1-t_2$  期间,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  同时都是高电平, 其下的势阱 1 和 2 交叠在一起, 这样原存在势阱 1 中的电荷, 就为势阱 1、2 所均分。在  $t_2-t_3$  期间, 由于  $\phi_1$  脉冲下降, 势阱 1 变浅, 则其中所存的部分电荷就倾入较深的势阱 2 中去了。在  $t_3-t_4$  期间, 全部电荷存在势阱 2 中。在此后的  $t_4-t_5$ 、 $t_5-t_6$  和  $t_6-t_7$  各段时间里, 在势阱 2 和势阱 3 之间, 又发生如前所述的均分电荷、电荷倾入及存贮的同样过程。继续此过程, 再经过  $t_7-t_8$ 、 $t_8-t_9$  及  $t_9-t_{10}$  之后, 电荷就又传递到势阱 4 中去了。这就完成了注入电荷的一次传送。

在三相时钟脉冲作用下的相邻三个电极, 如上述的电极 1、2、3, 构成了 CCD 的一个存贮单元 (也叫作“庖斗”或“象素”)。存贮单元阵列再加上输入、输出电路就是 CCD。

CCD 分为线阵与面阵两种型式。前者由一串“庖斗”组成, 而后者是由“庖斗”矩阵组成。此处拟以面阵 CCD 为例, 对 CCD 工作过程作一简介 (见图 2)。

CCD 用作模拟移位寄存器时, 信号电荷是由输入二极管注入的, 而所注入的电荷量和输入端所加电压成正比。在串行输入时钟  $\phi_{11}$ 、 $\phi_{12}$  和  $\phi_{13}$  驱动下, 信号电荷边注入边向右推移。当输入移位寄存器存满时, 并行传输时钟  $\phi_{21}$ 、 $\phi_{22}$  和  $\phi_{23}$  开始工作, 在它们驱动下, 把输入移位寄存器中所存的信息并行传送到“庖斗”矩阵的第一行中去。此后空出来的输入移位寄存

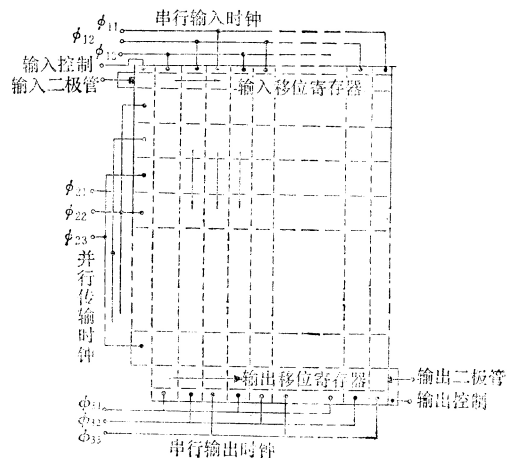


图 2

器又可注入信息；注满一次，下推一行。当最先进入“罅斗”矩阵的一行信息进入输出移位寄存器后，在串行输出时钟  $\phi_{31}$ 、 $\phi_{32}$  和  $\phi_{33}$  驱动下，该行信息依次向右移出。此信息移出和信息注入是同步动作的，即是输入移位寄存器存满信息所需的时间和输出移位寄存器移出全部信息所需的时间是相等的。这样就很容易看出，信息注入、并行下移及串行读出可以自动同步进行，这只要选串行输入、输出时钟的频率比并行传输时钟频率高，且其所高的倍数正好是输入（或输出）移位寄存器中“罅斗”的个数即可。

当 CCD 用作图象传感器时，信号电荷是由光电效应形成的；而用作探测器时，信号电荷则是由所要探测的粒子的游离形成的。但是各种用途的读出方式都是同样的。

标志 CCD 性能的主要指标是转移效率和暗电流。前者是传送前后相邻“罅斗”中电荷量之比；对于用三相时钟驱动的情况下，转移效率在 99.9%—99.99% 之间；它和所用时钟频率有关，频率越高，转移效率越低。可由所要求的模拟信号传输精度来适当地选定时钟频率及模拟移位寄存器的“罅斗”个数。而后者——暗电流是在无光照情况下，势阱俘获热运动产生的电子所形成的噪声电流，在室温下，其值在 10—100 nA/cm<sup>2</sup> 之间。由于它的存在，限制了 CCD 的灵敏度。但在低温环境下，暗电流可以大大减小。

## 二、CCD 在径迹室中作图象传感器

CCD 作图象传感器有很多优点，如体积小、寿命长、信噪比高、图象保真度好、耗电省（只需低压供电）及对红外线灵敏等皆是传统的光电传感器所不及的。近几年来，把它引入到径迹室（光学火花室、流光室）作图象传感器，实现了径迹图象信息数字化。下面介绍 CCD 图象传感器及相应的电子学读出电路框图（见图 3）。图象通过光学系统聚焦成象在 CCD 上。CCD 的各“象素”上所形成的电荷量正比于照射其上的光强度。所以“象素”矩阵的电荷分布图象，也就相应于所要分析的光学图象信息。象图 4 那样，通过电子学线路的工作，依次读出各“象素”中所存电荷信息。当读出的信号幅度大于某一阈值时，甄别器就给出一个信号使时钟产生器停振 25  $\mu$ s，以便在此期间进行模-数变换及把正在分析的模拟信号在 CCD 中的坐标（即

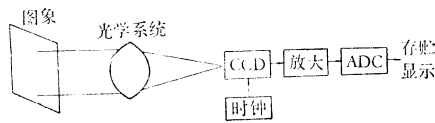


图 3

X、Y 计数器所记的数据)送往计算机去。在甄别器上设置一阈电压的目的是为了消除暗电流的影响。

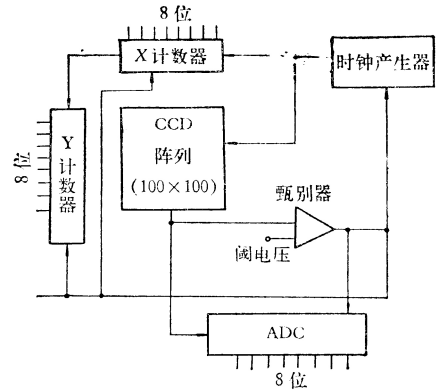


图 4

这样，在把 CCD 上所有“象素”中的信息读出之后，在计算中就存贮了一幅径迹图象信息；这些信息可以实时进行分析，也可以通过终端显示来观测和监视整个试验过程。

有人介绍过，CCD 比高灵敏胶片 Kodak SO-143 的灵敏度要高十倍以上，这就意味着用了 CCD 可以在不要象增强器的情况下工作，这对流光室来说是非常有利的。

除此之外，还有人介绍过用于光学火花室的 CCD 径迹分析系统。通过与普通相机系统的对比试验，证明 CCD 系统性能更好，如照相机系统的火花分辨是 16mm，而 CCD 系统是 11mm。

CCD 在径迹室中的应用刚刚开始，在经改进之后，有可能使室本身的性能大大改善，特别是有可能提高数据采集速率，克服由光学照相系统所带来的致命弱点。

## 三、CCD 在单次脉冲取样分析中的应用

单次脉冲记录分析在很多重要科研及应用领域中，如核爆炸效应测量、激光研究及高能物理探测器的研制中都是十分有用的。

单次脉冲记录分析常用的仪器有示波器和单次脉冲取样分析器。由于前者笨重、易碎和使用不方便，所以在不少场合人们喜欢用后者。

单次脉冲取样分析的方法有两种，其一是把被分析的信号同时加到各取样门，而各取样门的取样时间依次延迟；另一个是把被分析的信号经过一串延迟线之后分送到各取样门去，而取样却在同一瞬间。

在各取样点上要有一套取样-保持电路。在有些应用中需要多个取样点，如在时间投影室中需要上万个取样点。这样大的分析系统，若用常规的元器件来作不但异常复杂、庞大、造价高及耗电大，而且技术上相当困难；特别是对于高速短脉冲的分析，要把成千上万个取样-保持电路作得性能一致是很不容易的。由于上述原因，单次快脉冲取样分析技术的发展受到了

很大限制。而 CCD 的问世给单次脉冲取样分析带来了新的希望，真可谓“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”！

下面介绍 CCD 单次脉冲取样分析器的工作过程（见图 5）。

输入信号经过三个 1 毫微秒延迟线之后，分别送到四个取样门去，从而在同一个取样脉冲作用下，实现了相继延迟 1ns 的四次取样。在频率为 250MHz 的时钟脉冲驱动下，每取一次样，就向右推移一次，直到每个移位寄存器都存满为止。如果移位寄存器字长为 128，所以一块 CCD 就能实现 512 个取样-保持电路、

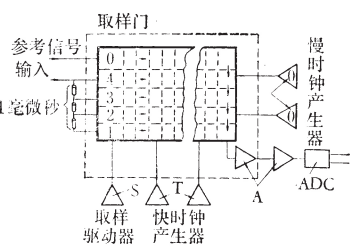


图 5

幅度分析误差小于  $\pm 0.2\%$  的单次快脉冲取样分析电路系统。

除此之外，也已开始把 CCD 用于时间投影室读出电路，使这庞大的读出电路变得简单、造价低及功耗省了。

时间投影室是近几年发展起来的新一代高能物理探测器。其特点是它可以把复杂径迹的三维图象坐标在很短的时间里传给计算机。在时间投影室里，要通过动量和电离密度的组合测量来定出粒子的质量，因而要作与时间相关的幅度测量。这就要测出一个“事例”的各条径迹上所有点的时间-幅度信息，因而需要几千甚至上万个时间-幅度测量道；如在伯克利正建造的时间投影室就有 14000 个这样的测量道。

为了使这样复杂的读出系统切实可行，他们用了“仙童公司”的 CCD321A 作取样-保持器件。每块 CCD321A 里有两个独立的模拟移位寄存器，每一个有 455 个存贮单元；每块的价格仅是 50 美元。

在图 6 里给出一个测量道的简单框图。被分析的丝信号经放大后送到 CCD321A 输入端去，在 20MHz 时钟驱动下，CCD 取样输入信号并连续右传。这样就把脉冲幅度信息作为时间的函数存贮在 CCD 中了。CCD321A 中的每个模拟移位寄存器可以记录大约 23 微秒内输入信息幅度的变化情况。把所有各 CCD 中



图 6

所存的信息读出并经模-数变换后送往计算机。在计算机中就可把各条径迹上的电离密度及各径迹的空间图象信息存贮下来并进行分析。

如此庞大的读出系统若不用 CCD，其复杂之状、造价之高是不难想象的。

#### 四、CCD 探测器

在 高能物理、天体物理和核物理等实验中，都已开始探索把 CCD 用作探测器。下面介绍由卢瑟福实验室的 CJS Damerell 等人所推荐的 CCD 高空间分辨探测器作为这新趋向的一个例子。

我们知道，尽管带聚数的粒子在高能强子碰撞中有相当大的产生机率，但在鉴别和分类方面进展一直很慢。其主要困难是因为存在大量末态粒子，很难弄清楚各个末态粒子都是在空间那些“顶点”上产生的。

为了闯过这一难关，迫切需要有高分辨率的探测器，以便能分辨出各个“顶点”并把各条径迹适当地归到所属的各“顶点”上去。虽然混合谱仪及高分辨泡室在这方面曾作出过贡献，但它们工作速率太低，难以胜任带有“b”味（以至“r”味）的粒子的研究任务。而 CCD 的固有特性却很适宜于这方面的要求。

根据 CJS Damerell 等人的介绍，把 CCD 一片挨一片地放在靶的后面（见图 7）。当带电粒子通过它们时，就在所穿过处的沟道和基片硅中产生一连串电子-空穴对，这些由电离产生的电子落入邻近的势阱之中就形成了信号电荷。按照前面介绍过的 CCD 的读出方式，可以确切地知道各信号电荷在 CCD 中的坐标，从而可以确定各末态粒子通过的径迹，并可由此外推出产生末态粒子的各个“顶点”。由于 CCD 矩阵中各

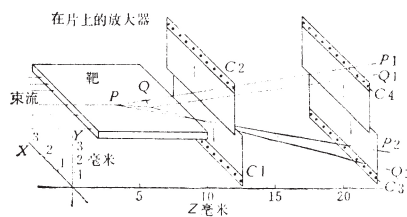


图 7

“帘斗”的间距很小，可以小到  $1\mu\text{m}$ ，所以用 CCD 作探测器可以得到很高的空间分辨率。CCD 的另一优点是其中电荷被传递在极小的电容上且暗电流很小，所以很适宜于高灵敏电荷检测。

据 CJS Damerell 等人所作的蒙特卡罗模拟和对其它有关工作的分析，他们认为只要把现有的 CCD 稍加改进，就可做成达到下列指标的高能物理探测器：

- 1) 二维空间测量的精度达到  $3\mu\text{m}$ ，
- 2) 双径迹分辨  $60\mu\text{m}$ ；

3) 时间分辨 500ns;

4) 读出时间 4ms;

5) 抗辐射强度 (radiation hardness)  $3 \times 10^5$ rad, 相应于可以在每秒  $10^6$  个粒子的强子束下工作一年以上。

此种类型粒子探测器研制成功后,有可能会推动 80 年代基本粒子的研究。

此外, CCD 作为天体物理和核物理实验中的探测器,已开始进入实用阶段。比如把 CCD 用在 X-射线和超紫外线望远镜中,用来测定太阳表面温度及研究太阳耀斑和日珥的细节就是应用实例中的一个。

综上所述,虽然 CCD 用在高能物理、天体物理和核物理探测器中只有几年的历史,但它已使上述这些领域中的科技人员受益很多,并给了他们很多新的启示。相信这初露锋芒的 CCD 在探测器研制和物理实验中将会起到更大的作用。