

电 荷 耦 合 器 件

骆 天 相

(中国科学院物理研究所)

电荷耦合器 CCD (charge coupled devices) 是本世纪七十年代初, 在金属-氧化物-半导体工艺基础上发展起来的一种新型的半导体表面功能器件。当以适当的次序对器件施以时钟脉冲后, 它上面的电荷包就会沿半导体表面进行可控的有序移动。利用这个基本原理可以制造出具有不同性能的 CCD 器件, 例如具有图像传感、信息传送、处理和数据存贮等功能的器件。

CCD 的基本结构元是金属-氧化物-半导体 (MOS) 电容器, 一个 CCD 器件是由许多这样的元电容组成, 每一个元电容都代表一个信息元。把信息变为存贮在电容器上的电荷量, 这是 CCD 的特点。信息的注入可以用半导体光电效应产生, 也可以用电的方法产生。若按功能来分, CCD 器件大致可分为三类: CCD 图象传感器、CCD 模拟延迟线和 CCD 数字存储器。CCD 图象传感器是一种固体摄像器件, 信息由半导体光电效应产生。而 CCD 模拟延迟以电的方法注入信息。这种延迟线的一个最大特点是, 延迟时间可以由外加时钟脉冲来控制。CCD 模拟延迟线实质上也是一个模拟存储器, CCD 数字存储器正是利用它来进行循环再生的一种动态存储器。

一、电荷耦合器的基本工作原理

让我们先来看看构成 CCD 的基本结构单位——MOS 电容器的结构和存贮电荷的机理。如图 1 所示, 在一块 P 型硅 (p-Si) (或 n-Si) 衬底基础上, 生长一层 (SiO_2) 薄膜, (膜厚 $1000 \sim 1200 \text{ \AA}$), 膜上再蒸发上一层金属, 再在衬底和金属层上分别引出一个电极, 这样就构

成了一个孤立的 MOS 电容器。

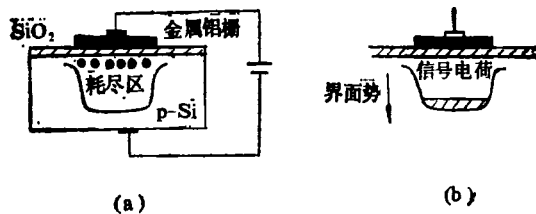


图 1

(a) MOS 电容存贮电荷原理; (b) 有信号电荷的势阱

若对 MOS 电容器加上如图 1(a) 所示的电压, 在电场作用下, 硅中的多数载流子(空穴)被推离半导体表面, 于是在相应金属层下的硅表面处形成一个势阱, 如图 1(b) 所示。势阱可用界面势表示, 它的深度与所加偏置电压大小有关, 电压愈高, 耗尽层愈厚, 阱也就愈深。少数载流子(这里是指电子)作为信号掉进势阱后就被存贮起来, 然而对于正电荷的空穴却很难通过势阱。这就是 MOS 电容器电荷存贮的基本原理。所谓电荷耦合器, 实质上是由一些间距极小的 ($< 3 \mu\text{m}$) MOS 电容阵列所构成, 根据不同的用途再加上输入输出端, 就构成了基本的 CCD 器件。由于相邻两个 MOS 电容靠得很近, 以致它们的耗尽区域发生交迭, 这就是所谓的势阱“耦合”。由于势阱间存在着这种耦合的关系, 当相邻两个电容加上不同的电压后, 形成的阱深也不一样, 于是电荷就由浅的势阱往深的势阱转移。利用这种“耦合”的特性, 只要在各相邻电极间加上适当的周期性变化的电压, 电荷包就可以从一个电极转移至相邻电极, 不断地往前传送, 这就是 CCD 电荷转移的机理。

下面以三相 CCD 的基本模式为例加以阐述。将 CCD 的金属表面电极人为地分成三组(图 2),分别用 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 表示。同一符号的电极并联在一起。在三组电极上施加图 2(b) 所示的脉冲电压。当 $t = t_1$ 时,只有 ϕ_1 处于高电位, ϕ_2, ϕ_3 均处于低电位,于是在所有 ϕ_1 电极下都出现一个深阱。如果用电注入或光产生的方法,使得 ϕ_1 下面得到一个电荷包(信号),此电荷包此刻就被封闭在 ϕ_1 阱内。当 $t = t_2$ 时, ϕ_1, ϕ_2 均处于高电位, ϕ_3 仍为低电位,这时 ϕ_1, ϕ_2 形成一个公共势阱,原 ϕ_1 中的电荷均匀分布在公共阱底中。当 $t = t_3$ 时, ϕ_1 电位开始下降, ϕ_2, ϕ_3 仍保持 t_2 时的电位,此时 ϕ_1 阱底上升,电荷从阱 1 逐渐转移至阱 2。 $t = t_4$ 时,只有 ϕ_2 是高电位,这时全部电荷均由阱 1 转移至阱 2。随着脉冲电压信号周期性的改变,阱 1

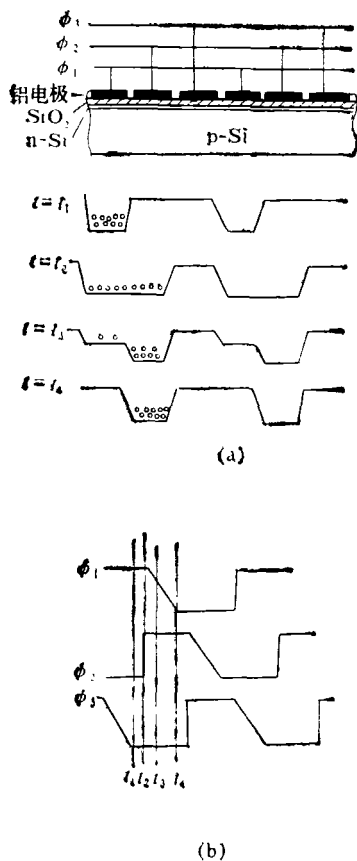


图 2 三相 CCD 原理图
(a) 不同时刻的势阱; (b) 三相电压波形

里的信号电荷就会转移到阱 2,阱 3……一直转移至输出级,这就是三相 CCD 电荷转移的基本原理。一个完整的 CCD 器件,除了基本 CCD 单元外,还需在两端分别加上输入,输出单元。

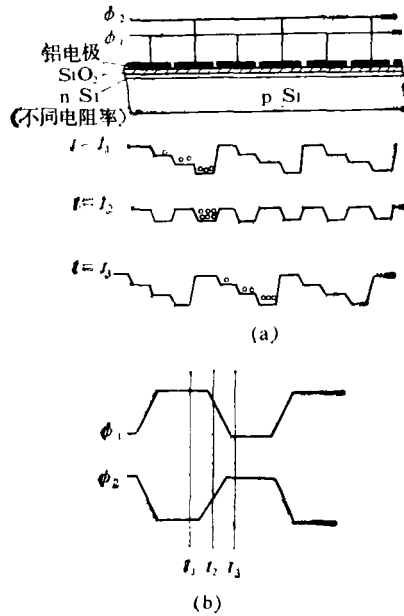


图 3 二相时钟 CCD 原理
(a) 不同时刻势阱; (b) 两相时钟波形

三相 CCD 器件要求外部电路提供的控制波形是非常严格的,因而外部电路较复杂。为了使外部控制电路简单些,除了三相 CCD 器件外,还有二相时钟 CCD 器件。其中一种结构是在 SiO_2 绝缘层下,相应于每一电极下分成两个区域分别沉积上一层不同电阻率的 n 型硅,使其在同一电场下能够形成两个深度不同的阱,如图 3 所示。在两相时钟脉冲作用下也同样能完成三相时钟的功能,使电荷由左至右转移。由于两相时钟是对称的,所以控制线路要简单得多。

在图 2 和图 3 中, SiO_2 绝缘层下加进 n 型硅层的目的是使电荷转移效率提高,因为转移效率是 CCD 的一个重要参数。加进了 n-Si 层后,就可以使势阱的最大电位从界面转移到体内,从而减少了电荷与界面的相互作用(电荷被界面态所俘获),所以也就提高了转移效率。这

种结构就叫做体内信道电荷耦合器件,也叫“埋道 CCD”。当采用埋道结构和电极重叠结构后,可以使 CCD 的转移效率达到 99.99%。

衡量 CCD 器件的参数,除了转移效率外,还有噪声电平、线性度和暗电流等。

二、CCD 器件的应用

CCD 器件的应用主要有三个方面: 固体图像传感器、模拟信号处理、数字存储器。

1. CCD 固体图像传感器

真空电子束扫描摄像管存在着许多缺点,而 CCD 图象传感器则弥补了这些缺点。它不但体积小,功耗低,而且坚固,抗振动,抗冲击,抗电磁场等,这是一般电真空器件所无法比拟的。在可靠性和寿命性能方面也十分引人注目。它们主要用在电视摄像,图象传真,生产过程监控,测量,文字读出等方面。CCD 固体图象传感器又分为线阵传感器和面阵传感器两类。前者由一系列线阵光敏 CCD 单元组成,适用于监测一维变量。若用于二维图象测量,则第二维需用机械方式扫描。目前线阵 CCD 传感器已有 2k 传感单元,读出时钟高达 20MHz 的产品。面阵 CCD 图象传感器是由光敏单元组成二维矩阵型的结构, X, Y 方向均用电扫描以摄取图象。面阵 CCD 传感器产品参数主要是面向电视标准而设计的。光敏单元数约 20 万个。帧扫描频率为 60Hz, 水平时钟频率为 7.16Mc。两种类型 CCD 图象传感器其光谱响应范围视所用半导体材料而异,一般可用于整个可见光和近红外波段。CCD 摄像管基本结构如图 4 所示。线阵 CCD 用于文件和图片传真的原理如图 5 所示。

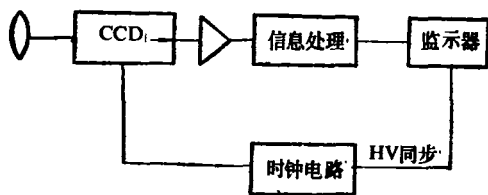


图 4 CCD 摄像管原理

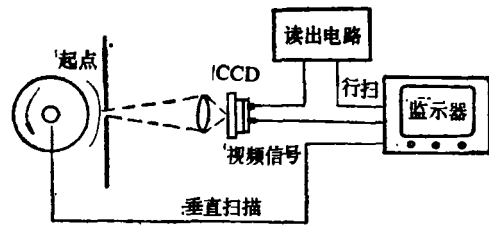


图 5 线阵 CCD 传真机原理

2. 模拟信号处理

信号处理是 CCD 的一个重要应用。绝大多数信号处理过程都需要对模拟信号进行精确的时间延迟。因 CCD 能够通过控制时钟,以极其精确的时间延迟来满足处理过程的要求,而且结构相当简单,体积也小,时延范围可从几百毫微秒至几秒。所以在模拟信号处理领域,它有着广泛的前途。尤其是在数字滤波器、相关处理和傅里叶分析中,应用 CCD 延迟线后不但使线路变得简单,而且可以使设备体积减小,成本降低。这里需要指出的是,以 CCD 为基础的模拟信号处理,实质上是对离散的模拟信号进行处理。图 6、图 7 和图 8 是 CCD 用以模拟信号处理的几个主要方面的示意图。

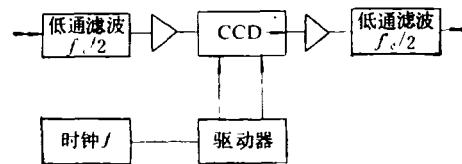


图 6 CCD 模拟延迟线

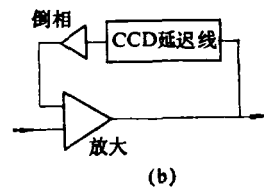
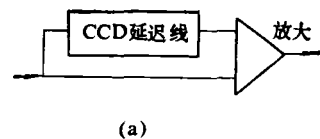


图 7 CCD 数字滤波器

(a) 一级横向滤波 (b) 一级递归滤波

(下转第 526 页)