

电荷转移器件

〔美〕C. H. 塞甘 M. F. 汤普塞 著

CTD

科学出版社

电荷转移器件

〔美〕 C. H. 塞甘 著
M. F. 汤普塞

王以铭 译

科学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了电荷转移器件[包括电荷耦合器件(CCD)和电荷链器件(BBD)]的基本原理、性能、工艺和应用等各个方面,反映出自1970年至1975年国际上电荷转移器件研究和发展的成果。

本书可供研制和应用半导体器件的科研人员和工程技术人员以及希望学习电荷转移器件的基本原理和了解国外发展水平的有关人员参考,也可供大专院校有关专业师生参考。

C. H. Séquin M. F. Tompsett
CHARGE TRANSFER DEVICES
Academic Press, Inc., 1975

电 荷 转 移 器 件

[美] C. H. 塞 甘 著
M. F. 汤普塞

王以铭 译

*

科 学 出 版 社 出 版
北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年7月第 一 版	开本: 787×1092 1/32
1979年7月第一次印刷	印张: 9 3/4
印数: 0001—18,100	字数: 218,000

统一书号: 15031·243

本社书号: 1481·15—7

定 价: 1.00 元

译 者 前 言

电荷转移器件, 包括电荷耦合器件 (CCD) 和电荷链器件 (BBD).

电荷耦合器件是本世纪七十年代开始发展起来的一种新型的半导体器件. 在 CCD 于 1970 年问世以前, 半导体表面理论, 特别是关于硅-二氧化硅界面的理论有了新的进展; 金属-氧化物-半导体 (MOS) 集成电路工艺已趋成熟. 这样, 人们认识和控制半导体表面的水平提高到了一个新阶段. 正是在这样的理论背景和实践基础上, W. S. 玻意耳 (Boyle) 和 G. E. 史密斯 (Smith) 在探讨磁泡器件的电模拟的过程中构思出了电荷耦合器件, 并迅即在实验上得到了确证. CCD 与双极型和 MOS 器件相比, 其原理是别开生面的, 这就赋予它的性能以一些独到之处. 但是 CCD 的制造可以在一般的 MOS 集成电路流水线上进行, 这就使得 CCD 发展得异常迅速. 短短的几年间, 具有不同电极结构, 不同输入、输出方式, 不同沟道类型, 不同设计布局, 不同大小规模的 CCD, 不可胜数地涌现出来. 半导体电子工业比较先进的一些国家相继投入了相当的人力物力, 大力地进行研究和发展. 在固体摄像、信号处理和存储等三个主要方面的应用, 都已有了长足的进展. 同时, CCD 与 MOS 和双极型器件相结合, 也有新的成果. 此外, CCD 是研究半导体表面的一种工具, 并推动着半导体集成电路工艺的发展.

CCD 从实验室研制开始, 迅速走上实用阶段, 并从 1973 年起已有市场商品出售, 品种不断增加, 性能继续提高, 这充

分说明了 CCD 作为一种有实用价值的半导体器件产品,已经站住脚了,并可望有进一步的发展。但是,在如此丰富多采、蓬勃发展的半导体器件领域内,CCD 的地位和作用如何,目前尚不容预测。最终决定 CCD 的前途的因素,也许是它在性能和成本上与其它半导体器件相竞争的潜在能力,以及在原理和工艺上与它们相结合的潜在可能性。

本书实际上是篇幅较长的一篇综述性文章,系统地介绍了自 1970 年至 1975 年电荷转移器件研究和发展的主要成果,包括基本原理、性能、结构、工艺和应用等各个方面,可以作为研制和应用 CTD 的有关单位,学习 CTD 原理和应用的有关人员以及希望了解国外 CTD 发展水平的有关部门的一本有价值的参考书。

译文中可能有差错和缺点,恳请读者不吝指正。

译者

于北京工业大学

1977 年 9 月

◆

原 序

自从 1969 年发明金属-氧化物-半导体 (MOS) 电荷转移器件 (BBD) 和电荷耦合器件 (CCD) 以来,电荷转移器件 (CTD) 领域内的研制工作有了很大的进展。这些器件的基本工作原理和性能极限现在理解得相当好,并且有了第一批电荷耦合延迟线、存储器和象感器的商品。因此,现在该是全面回顾这个问题的的时候了。

我们注意到这样一个事实,对 CTD 有兴趣的人,他们的情况会有所不同,而且他们期望从这样一个回顾中得到的回答也会完全不同。我们已经尽可能地考虑了所有人的需要。对那些想简要了解 CTD 及其各种应用的新手来说,我们建议他们先阅读第一、二章,接着细看一下第十章参考文献中列举的题目,然后倒过来阅读第九章。从事应用的系统工程师也许能在第五章至第八章中找到对他们的特殊问题的回答,这几章相当独立地分别论述了 CCD 作为象感器,信号处理机,存储器和专用阵列的应用。想了解电荷转移过程基本情况的读者将会发现第四章最有用,而未来的器件设计师和工艺工程师将能在第三章中找到一系列结构。

我们愿意利用这个机会向贝尔实验室中为我们提供了一个 CCD 的研究和估价环境的人们以及那些参予将这个基本思想发展成为功能器件的人们表达我们的谢意。我们还感谢贝尔实验室为本书的准备工作提供了时间和方便。为了使本书尽可能地反映最新情况,我们利用了贝尔实验室中的计算机和照相植字机来排出供照相制版用的母本。这就使我们能

够把在通常排版程序中阅读校样时已无法添加的那些新材料收入本书,并使有效出版周期大为缩短。

对于初稿进行了有价值的评论以及鼓励我们进行写作的许多人,应该特别致谢。他们之中有: R. D. 贝耶尔奇, W. F. 柯索诺契, G. E. 史密斯, K. K. 桑勃和 P. K. 威穆。

我们希望本书中的许多基本材料将能经得住时间的检验,但是,仍在继续进行的许多迅速而广泛的发展使得本书有必要出最新的版本,这也是我们有意尽到的义务。计算机存储的底稿具有灵活的适应性,它将使这一任务容易得多。考虑到本书的下一版,我们愿敦促读者向我们提出修改和评论意见。

C. H. 塞甘

M. F. 汤普塞

目 录

译者前言	i
原序	iii
第一章 引言	1
第二章 电荷转移器件原理	6
第一节 金属-氧化物-半导体 (MOS) 电容器	6
第二节 电荷耦合器件 (CCD)	10
1. 表面信道电荷耦合器件 (SCCD)	10
2. 体内信道电荷耦合器件 (BCCD)	12
3. 多数载流子电荷耦合器件	14
第三节 集成电荷链器件 (BBD)	14
1. MOS 电荷链器件	14
2. 结型场效应晶体管电荷链器件 (JFET BBD)	16
3. 双极型电荷链器件	16
第三章 物理构造	17
第一节 转移电极结构	17
1. 每单元三个电极的 CCD	17
2. 每单元四个电极的 CCD	21
3. 每单元两个电极的 CCD	23
4. 集成 BBD	27
5. 最小几何尺寸的 CCD	29
6. 特殊的 CCD 结构	36
第二节 转移信道	39
1. 横向界限	39
2. 表面信道和体内信道	40
第三节 输入-输出结构	44
1. 电荷输入	44

2. 电荷检测	49
3. 再生	54
4. 合并信道和转换点	56
第四章 物理性能	59
第一节 信号处理能力	59
1. 表面信道器件	59
2. 体内信道器件	63
第二节 转移损失率	66
1. 转移损失效应的定性分析	66
2. 转移损失效应的定量分析	69
3. 转移损失率计算的一般公式	72
4. 自由电荷转移对转移损失的效应	75
5. 电荷俘获对转移损失的效应	92
第三节 噪声	103
1. 转移噪声	103
2. 产生噪声	109
3. 电注入噪声	110
4. 信号检测中的噪声	112
第四节 线性	119
1. 转移	119
2. 电荷的光注入	119
3. 电荷的电注入	120
4. 电荷检测	123
第五节 暗电流	124
1. 暗电流的来源	126
2. 与时间有关的暗电流	127
3. 暗电流的数值	129
4. 暗电流的实际问题	131
第六节 功率	131
1. 内部功耗	132
2. 无功功率	133
第五章 电荷耦合形象传感	135

第一节 线型象感器	136
1. 读出结构	136
2. 线型象感器示例	140
第二节 面型象感器	144
1. 读出结构	144
2. 隔行扫描	149
3. 面型象感器示例	153
4. 彩色电视摄像机	161
5. 象感器中的信号处理	163
第三节 性能极限	165
1. 分辨能力	165
2. 弥散	170
3. 量子效率和光谱响应	175
4. 低亮度成象	176
5. 缺陷	178
第四节 背面光照	182
第五节 红外象感器	186
1. 基本考虑	186
2. 操作方法	187
3. 单片式红外象感 CCD	188
4. 混合式红外象感 CCD	191
第六章 信号处理中的CTD	193
第一节 模拟延迟	193
第二节 多路转换	199
第三节 递归滤波器	201
第四节 横向滤波器	208
1. 固定抽头权重, 匹配滤波器	209
2. 可调抽头权重, 有抽头的延迟线	218
第五节 相关	222
第六节 象感器中的信号处理	224
第七节 波形发生	226
第七章 数字存储器	227

第一节 存储器等级体系	227
第二节 CTD 存储器的存储容量和差错率	229
第三节 基本的存储器结构	234
1. 串行-并行-串行结构	234
2. 每位-电极操作方式	238
3. 蛇行和环行结构	240
第四节 非易失性电荷耦合存储器	246
第八章 二维和逻辑阵列	252
第一节 二维转移阵列	252
1. 基本电极排列方式	252
2. 布局和应用	254
3. 专用阵列	256
4. 二维象感器阵列	257
第二节 逻辑阵列	258
1. 基本逻辑单元	258
2. 二进制加法和乘法器	260
3. 通用逻辑阵列	264
第九章 结论	265
第一节 CTD 的理解和模型化	265
第二节 CCD 工艺	266
第三节 形象传感中的 CCD	269
第四节 信号处理中的 CTD	271
第五节 数字存储器用的 CTD	272
第六节 二维和逻辑阵列	274
第七节 未来	274
参考文献	276

第一章 引言

“电荷转移器件”(CTD)是一个总称,指的是一类固态电子功能器件,包括电荷链器件(BBD)和电荷耦合器件(CCD)*。如以适当的次序施加时钟脉冲,这些器件就能使电荷量有控制地穿过半导体衬底运动,利用这个基本机理,这些器件能够执行多得惊人的电子功能,这包括形象传感、数据存储、信号处理和逻辑运算。它们有希望在电信、计算机和日用电子学方面减小电子设备的体积和成本。

电荷转移的基本思想已经发展多年了,但是,直到1970年,当时制成了电荷耦合器件,至少在原则上,它是只需要一层金属化而无需扩散的集成电路,这才引起了人们的普遍兴趣。因为科学界早就在精神和工艺上作好了接受和发展新思想的准备,所以他们立即就抓住了在电极上适当加上脉冲可以使它们下面的势阱运动这一基本思想。从那以后,人们理解和发展这一思想的进程一直十分迅速,到现在,已经有了用途十分广泛的许多种商品。

利用把电荷存储在电容器上这一原理来制造存储器件,这并不是一个新概念,它可以追溯到最早期的电子束扫描电视摄象机和存储管^[354]。后来维纳(Wiener)^[350]发展了这一概念,使它与串行结构的CTD更为相象:“要在比较短的时间内贮存信息,最简单的方式之一就是把信息变为贮存在电容器上的电荷;若再配备一个电报机类型的重发器,它就会是一种

* 有一种看法认为,表面电荷晶体管(SCT)也包括在CTD中。——译者注

合用的贮存方法。”詹逊 (Janssen)^[137]比较具体地建议采用一系列理想缓冲放大器和理想开关,把模拟信号加在电容器上(图 1.1 a)。后来,用大量的真空管和电容器的确装配成了这种电路^[123],它是一个可变模拟延迟线,可用于校正磁带录音机中磁带速度的变动。这类电路称为“庖链”(bucket brigade),这是把它比喻为过去年代的一种救火工具(图 1.1 d)。1967年,这个原理又重新被提起,它先是用双极型晶体管实现的(图 1.1b)^[167,243],接着,又用金属-氧化物-半导体场效应晶体

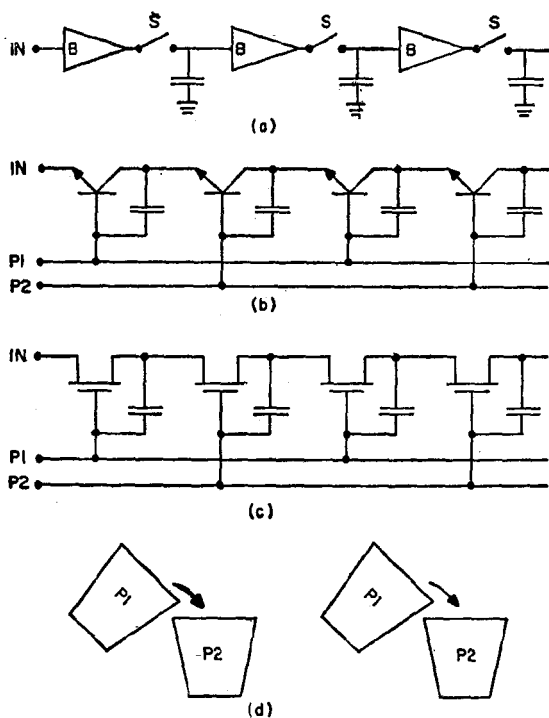


图 1.1 电荷转移电路,采用(a)理想化的缓冲放大器,(b)双极型庖链,(c)MOSFET 庖链装置,(d)用水桶的二相系统略图对比。

管 (MOS FET) 做成(图 1.1 c)^[241,242]。现在所谓的电荷器件 (BBD),就是这类 MOS 型的电路的全集成化^[241]。

玻意耳和史密斯 (Boyle 和 Smith)^[40] 是沿着一条与上述这方面工作相独立的不同道路,他们在探索磁泡器件^[33]的电模拟工作中,于 1969 年构思了电荷耦合器件 (CCD) 的原理。他们提出,紧密排列在半导体的绝缘表面上的电容器,可以用来贮存和转移电荷。如果按适当的次序对这些电极加上脉冲,它们就会产生携带一包包少数载流子的运动势阱。他们首先提出的一种器件结构,是采用相同的电极和三相时钟系

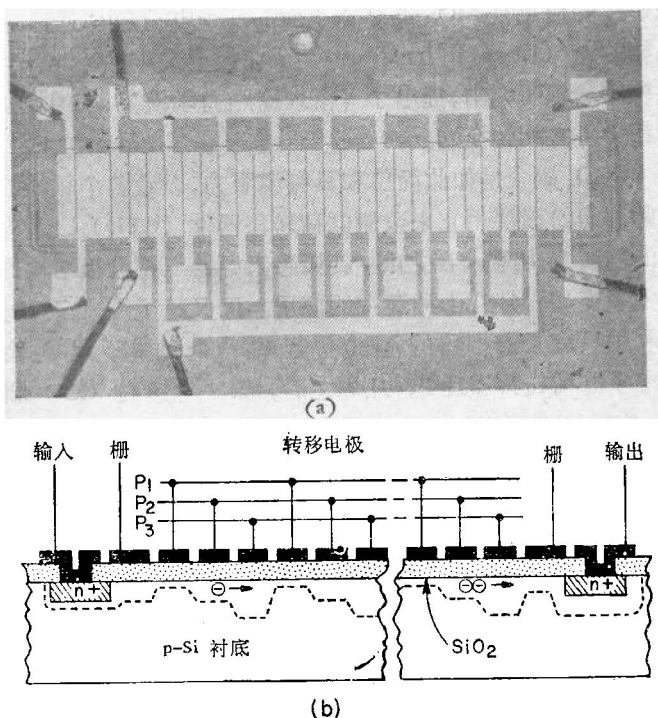


图 1.2 第一个电荷耦合器件,有 8 个三相单元,输入-输出栅和二极管。(a)俯视图,(b)剖面略图^[316]。

统,为隔离各个电荷包,最少需要三相。接着,卡恩和尼考连(Kahng 和 Nicolian)^[141]立即指出,如果设法在电极中引进某种不对称性,有可能设计出只需要二相驱动的结构。

一项发明往往是时代的产物,所以,评论一下与 CCD 有某种关系的其它独立的发展,是令人感兴趣的。当时,制造表面电荷晶体管的工作正在开展^[99],这种器件是将常规 MOS FET 的源、漏用 MOS 电极下面形成的反型层来代替。若把这种器件串联起来,便能够构成具有交迭电极的一种电荷转移器件。在半导体随机存取存储器领域内,发展了一种动态存储单元,被贮存的信息是 MOS 电容器下面的一个电荷包^[218,327]。基伊思和兰道(Keyes 和 Landauer)^[147]在关于最小功耗的计算机系统的一项研究中,提出了一个理论热力学模型,其中粒子就是在势阱之间转换的。

CCD 概念是如此简单和具有说服力,以致各个领域的工程师都纷纷设法用它来改制电荷转移器件(CTD)以适应他们的需要。几乎一夜之间,就设想出原始三相电极结构的许许多多变型和好几十种潜在的应用。仅仅花了没几天功夫,就利用具有紧密相间的测试电容的一个结构,从实验上证实了电荷转移原理^[8],几周之后,第一个 8 位 CCD 制成了,它被证明可以用作延迟线和简单的线型象感器^[316]。两年后,制成了用作低分辨能力电视的象感器的 13,000 单元的 CCD^[259]。

CTD 在工艺上发展得如此迅速,是因为已经有了好几种 MOS 工艺,它们最终解决了早期的开启电压稳定性问题,所以,能够用来制造这些新器件。这也就是说,CTD 从构思到制成进展极快,是因为新设计能够在现成的流水线上制造。MOS BBD 用标准的 MOS 流程即能制成,而对于 CCD,尽管某些早期文章说它的工艺简单,但为了达到所要求的性能和

可靠性,通常要求略为复杂的工艺。为什么 CCD 的实验室模型一个接一个取得成功,速度很快,而合用的 CCD 商品的出现却没有象预料的那么快,其原因之一,就是 CCD 工艺比较复杂。此外,还有一些实际问题有待解决,它们是与外围电路设计,以及为获得高成品率、良好线性、高信噪比和低暗电流有关的。而且,既然适应各种不同应用的 CTD 种类繁多,设计和工艺流程问题也不尽相同,因此,花在发展任何单项应用上的努力就减少了。

绝大多数 CCD 结构的流程,要比 BBD 的复杂,换到的好处是,CCD 的固有性能比 BBD 好,亦即转移效率较高,转移噪声较低,因而在许多应用上比较可取。迄今为止, BBD 几乎只是应用在音频或视频延迟或滤波上,而当初 CCD 引起的轰动,大都是由于它有可能用作全固体电视摄像机或传真电报系统中的象感器。后来 CCD 进入了信号处理和模拟取样数据系统的领域,它们能够提供带几百个加权抽头的横向滤波器,并且能够使象实时傅里叶变换装置这样复杂的系统小型化。对于采用最小为 16,384 位和功耗较低的 CCD 芯片的小型大容量数字存储器,也有越来越大的兴趣。

本书包括 CTD 从物理原理到具体应用的整个领域。第一部分介绍 CTD 的基本原理以及许多不同的具体形式。然后讨论电荷转移的机理以及器件性能退化过程的物理原理。我们将介绍这些退化过程和器件的输入、输出部分对性能所施加的限制,以及减轻这些效应的方法。后面几章将广泛地综述 CTD 在形像传感、信号处理、数据存储、逻辑运算和某些其它方面的应用。

第二章 电荷转移器件原理

本章将简略地介绍某些电荷转移器件的基本单元和工作原理,对象是完全不熟悉基本原理的读者。然而,我们假定,读者对于硅集成电路制造原理有一些了解^[331,221]。

第一节 金属-氧化物-半导体 (MOS) 电容器

许多电荷转移器件的基础,都是金属-氧化物-硅 (MOS) 电容器,所以我们将简单地复习一下它的物理原理,以作为理

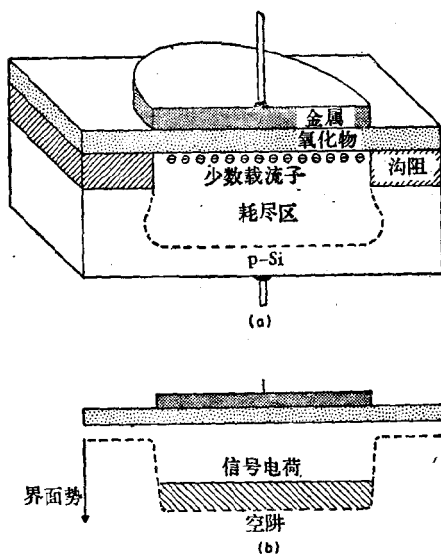


图 2.1 (a)用作少数载流子贮存单元的 MOS 电容器剖面图, (b)有信号电荷的势阱, 图上用阱底的液体代表。