

电荷耦合器件 原理与应用

王以铭 编著

科学出版社

73.7,
126

电荷耦合器件原理与应用

王以铭 编著



科学出版社

1987

8710468

内 容 简 介

本书系统地介绍了电荷耦合器件(CCD)的基本原理和物理性能,以主要篇幅着重阐述 CCD 的应用原理,并专辟两章通过实例介绍应用方法,最后一章介绍 CCD 的最新进展。

本书主要对象为应用 CCD 的广大科技人员,也可供大专院校有关专业师生和研制 CCD 的人员参考。

DL35/24

电 荷 耦 合 器 件 原 理 与 应 用

王以铭 编 著

责任编辑 唐友群 刘晓融

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

*

1987 年 5 月 第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1987 年 5 月 第一次印刷 印张: 15 5/8

印数: 0001—2,400 字数: 354,000

统一书号: 15031·815

本社书号: 4962·15—7

定 价: 3.70 元

序 言

电荷耦合器件 (CCD) 是美国贝尔实验室的 W. S. Boyle 和 G. E. Smith 在 1970 年前后发明的新型半导体器件。它经历了以研究为主的发展阶段,在五年左右的时间内,建立了以一维空阱模型为基础的 CCD 基本理论,这个理论与实验结果大致相符,并满足了指导器件进一步发展的需要。与此同时,依靠业已成熟的 MOS 集成电路工艺,CCD 迅速地从实验室走向市场。CCD 在影象传感、信号处理和数字存储等三大领域中的广泛应用,充分显示出它的巨大潜力,在微电子学中独树一帜。CCD 已被普遍认为是七十年代以来出现的最重要的一种半导体器件。

CCD 的制造工艺就是 MOS 工艺,这是 CCD 发展特别迅速的的决定性因素。随着集成电路技术的不断发展,必然出现规模越来越大、性能越来越理想以及功能越来越丰富的电荷耦合器件。但是,CCD 的工作原理既不同于 MOS 器件,也不同于双极型或其它器件;它既不是一种单管器件,也不能看作是集成电路。

这里,我还想强调指出,CCD 在应用方面有不少独特之处,它的普及推广存在着一些特殊问题。首先,CCD 工作所需的外围电路比较复杂,如果搞得不好,往往会影响器件的性能。在完成外围电路集成在器件芯片上以前,使用者应该充分认识外围电路的重要性。其次,尽管 CCD 基本工作原理并不复杂,它的电荷存储、电荷转移和光电转换等基本功能也不难理解,但是,由于派生、组合所得到的功能却异常丰富,应

用范围十分广泛,应用形式多种多样。因此就提出了一个如何才能有效地向广大 CCD 的潜在用户传递有关信息以期推广使用的问题。

在国内,CCD 的研究工作虽然也有一定的进展,一些单位在研制和应用方面取得了可喜的成果。但是,就 CCD 的应用潜力而言,如果说目前只发挥了 1% 左右,也许并不是夸张。这意味着,工业、科研和国防等许多部门和单位,完全有可能应用 CCD 来提高产品质量,开发新产品或者解决技术问题,而目前许多单位并没有这样做。造成这种状况的主要原因是科技信息流通渠道不畅,传播范围较窄。许多技术人员并不知道 CCD 或者不懂得如何应用,因此自然想不到 CCD 是解决他们面临的不少课题的有力工具。

国际上第一本电荷耦合器件专著 (C. H. Séquin and M. F. Tompsett, *Charge Transfer Devices*) 经本书作者翻译,由科学出版社在 1979 年出版,在向国内介绍 CCD 方面起了一定的作用。但是,该书以及国外其它一些专著在应用原理和方法上的内容难以满足国内推广应用 CCD 的要求。此外,鉴于 CCD 发展很快,不少内容也需要更新补充。针对这种情况,本书以推广应用 CCD 为编著宗旨,力求向各行各业科技人员比较系统地阐述 CCD 的应用原理和方法,无疑具有一定的价值。

根据这个宗旨,本书在对基本原理和性能方面进行了简要但是足够的阐述以后,将主要篇幅用于 CCD 的两个主要应用领域:影象传感和信号处理。对于每个领域,除了用一章阐明应用原理外,专辟一章通过具体例子介绍应用方法。与国际上 CCD 专著、教科书相比,本书的应用部分,内容比较充实,叙述比较深入,形式也比较适合。

本书的最后一章以“发展中的 CCD”为题介绍了 CCD 的

新进展，主要是八十年代的进展。就一门正在迅速发展的科学技术而言，编写此书的最大困难之一是，在出版过程中，某些内容已趋于陈旧，某些新进展又必须写入书中。本书的做法是针对这个问题的一个有益的尝试。

在电荷耦合器件经历了十五年发展的今天，我国开始有了这方面的著作，尽管它可能还不很完善，但毕竟是一件可喜的事情。

张德有

一九八四年八月

目 录

第一章 CCD 的基本工作原理	1
第一节 电荷存储	1
第二节 电荷转移	8
第三节 CCD 的电极结构	13
1. 三相 CCD	13
2. 二相 CCD	16
3. 四相 CCD	19
第四节 信号转移沟道	23
1. 表面沟道和体内沟道	23
2. 转移沟道的横向界限	28
3. n 型沟道和 p 型沟道	29
第五节 电输入和信号检测结构	31
1. 电输入结构	31
2. 信号检测结构	38
第六节 外围电路	48
1. 引言	48
2. 时钟脉冲	49
3. 时钟发生器	53
4. 新一代的驱动器	55
5. 外围电路集成化	56
第二章 CCD 的物理性能	59
第一节 信号处理能力	59
1. 表面沟道器件	59
2. 体内沟道器件	64

第二节 转移效率·····	67
1. 转移损失率的简单测试方法·····	67
2. 转移过程的理论分析·····	70
第三节 存储时间和暗电流·····	85
第四节 噪声·····	94
1. 转移噪声·····	94
2. 电输入噪声·····	99
3. 输出噪声·····	102
4. 暗电流噪声·····	105
第五节 功耗·····	106
1. 内部功耗·····	106
2. 外部功耗·····	108
第三章 CCD 象感原理·····	110
第一节 CCD 象感的物理基础·····	110
1. 半导体的光吸收·····	110
2. 光电转换·····	114
第二节 线型象感器·····	115
1. 单线结构·····	116
2. 双线结构·····	118
第三节 面型象感器·····	120
1. 帧传输结构·····	120
2. 行间传输结构·····	131
3. 两种传输结构的比较·····	135
第四节 CCD 象感器的性能·····	138
1. 量子效率和响应·····	138
2. 噪声性能·····	144
3. 分辨能力·····	145
4. 线性度和动态范围·····	152
5. 缺陷和拖影·····	154
6. 均匀性·····	157

第五节 象感器的新结构和新工作模式	159
1. “Z”形传输结构	159
2. 参差孔成象模式	160
3. 延时-积分 (TDI) 工作模式	165
第六节 红外象感	169
1. 概述	169
2. 混合式红外象感器	172
3. 单片式红外象感器	175
第七节 低照度摄象	181
1. 概述	181
2. 图象增强器 + CCD	185
3. 电子轰击 (EB) 模式	187
第四章 CCD 在象感领域的应用	190
第一节 可见光象感	190
1. 文件扫描	190
2. 工业用摄象机	193
3. 飞行帽上的瞄准系统	196
4. 动态条件下的轮廓测量仪	199
第二节 非可见光象感	205
1. X 射线成象	205
2. 紫外线成象	208
3. 电子束成象	210
4. 探测最小电离粒子	218
5. 红外探测技术	218
第三节 彩色象感	221
1. 单片象感器-彩色电视摄象机	221
2. 电视台播放彩色影片	228
第四节 象感领域的其它开发应用	230
1. 新型宽动态范围光探测结构	230
2. 自调焦相机	234

3. 高分辨能力、可拼接的 TDI 模式象感器	235
4. 模拟图象存储	238
5. 伽利略木星轨道飞行器中的800×800摄像机	240
6. 高精度制导用的跟踪器	242
7. 集成薄膜光学波导—— CCD 线型象感器	247
第五章 CCD 模拟信号处理原理	250
第一节 准备知识	251
1. 采样	251
2. 离散变换	252
3. z 变换	253
第二节 CCD 信号处理模块的性能	258
1. 存储时间	258
2. 时间-带宽乘积	258
3. 线性度	260
4. 动态范围	263
第三节 延时线	264
1. 基本形式	264
2. 多沟道形式	266
3. 性能	268
第四节 多路分路结构	268
第五节 CCD 横向滤波器(固定权重)	271
1. 概述	271
2. 分裂电极形式	274
3. 数学表述	276
4. 频域分析	277
5. 性能	281
6. 实际设计考虑	285
7. 分裂电极滤波器的改进	286
8. 横向滤波器的几种应用形式	288
第六节 相关器	298

第七节 递归滤波器	303
第八节 电可编程横向滤波器 (EPTF)	311
1. 用途	312
2. 加权方法	312
第九节 电荷域滤波	325
1. 电荷累加器	326
2. 数字电荷转移滤波	326
3. 电荷定向网络 (CRN)	327
第六章 CCD 在信号处理领域的应用	331
第一节 信号处理功能的开发	331
1. 对偶差分工作模式	331
2. 微处理机控制的抽头延时线	334
3. 信号处理功能块	336
4. 电可编程分裂电极横向滤波器 (EPSEF)	339
5. 利用 ROM 和 MDAC 的可编程横向滤波器	343
6. EPTF 大规模集成电路	345
7. 自适应滤波器	350
第二节 信号处理应用	353
1. MTI 相消器	353
2. 脉冲多普勒雷达处理器	356
3. 在现代音乐和音响系统中的应用	361
4. 超声成像系统的动态调焦透镜	364
5. PAL 译码器	369
6. 电视制式变换	372
7. 60 MHz 图象存储示波器中的时间轴变换	374
8. 标准电视质量的改进	377
第七章 发展中的 CCD	379
第一节 新型器件和新工作模式	379
1. 结型 CCD (JCCD)	379
2. 虚相 CCD	386

3. 抗弥散的新结构.....	392
4. 薄膜 CCD.....	395
5. 高速 CCD.....	396
6. 低转移损失工作模式.....	409
7. PLOSS 结构(硅扫描器上光电导层).....	413
第二节 新一代象感器.....	415
1. CCD 133 和 CCD 143 (美国 Fairchild 公司).....	415
2. TCD 102C (日本东芝)	421
3. OPA2048CA (日本冲电气)	426
4. 适合自调焦系统的线型象感器.....	431
5. 用浮置光敏二极管的行间传输 CCD.....	436
6. 高分辨能力 CCD 线型象感器的四线结构	439
第三节 模拟信号处理的新模块.....	444
1. 无源 CCD 谐振器.....	444
2. 电荷耦合模拟-数字转换器 (CCADC).....	451
第四节 其它.....	454
1. 设计超大规模集成 CCD 用的二维模型.....	454
2. 应用微处理机的 CCD 测试控制台.....	460
附录A 电荷器件(BBD).....	462
附录B 电荷注入器件(CID).....	466
附录C 一些国家的 CCD 研究单位.....	472
参考文献.....	474

第一章 CCD 的基本工作原理

电荷耦合器件 (CCD) 的最突出的特点在于它是以电荷作为信号, 而不同于其它大多数器件是以电流或者电压作为信号。CCD 的基本功能是电荷存储和电荷转移。因此, CCD 工作过程中的中心问题是信号电荷的产生、存储、传输和检测。

第一节 电 荷 存 储

构成 CCD 的基本单元是 MOS (金属-氧化物-半导体) 电容器, 或者称为 MOS 结构, 如图 1.1(a). 正象其它电容器一样, 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-SiO₂ 界面处的电势(称为**表面势或界面势**)发生相应变化, 附近的 P 型硅中多数载流子——空穴被排斥, 形成所谓耗尽层。如果栅电压 V_G 超过 MOS 晶体管的开启电压, Si-SiO₂ 界面处可以存储电子。由于电子在那里的势能较低, 我们可以形象化地说: 半导体表面形成了对于电子的势阱(图 1.1(b))。

当表面存在势阱时, 如果有信号电子来到势阱及其邻近, 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, 耗尽层将减薄。我们把这个过程描述为电子逐渐填充势

* 除非另有说明, 本书都假定衬底半导体是 P 型。

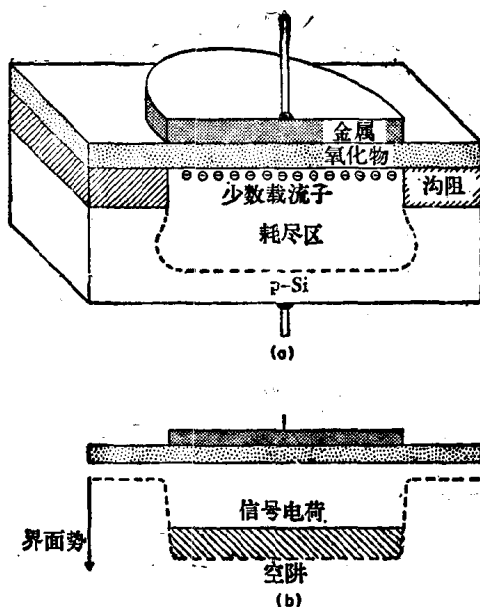


图 1.1 (a) MOS 电容器剖面图; (b) 有信号电荷的势阱

阱。势阱中能够容纳多少个电子,这取决于势阱的“深浅”,亦即表面势的大小,而表面势又随栅电压变化。

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**,以有别于光照下产生的载流子。热产生的多数载流子——空穴将通过衬底跑掉。

下面我们利用能带图和一些定量关系作进一步的讨论。

首先讨论在不同稳恒偏压下处于平衡状态的 MOS 结构。图 1.2(a) 是对栅极加负电压的情况。这时 P 型 Si 中多数载流子——空穴将向 Si-SiO₂ 聚集,称为多数载流子堆积。图的下半部给出了相应的电荷分布。

如果在栅极上加一个小的正电压,半导体表面层中的空穴将被排斥,形成耗尽区和荷负电,因为现在受主离子未被抵

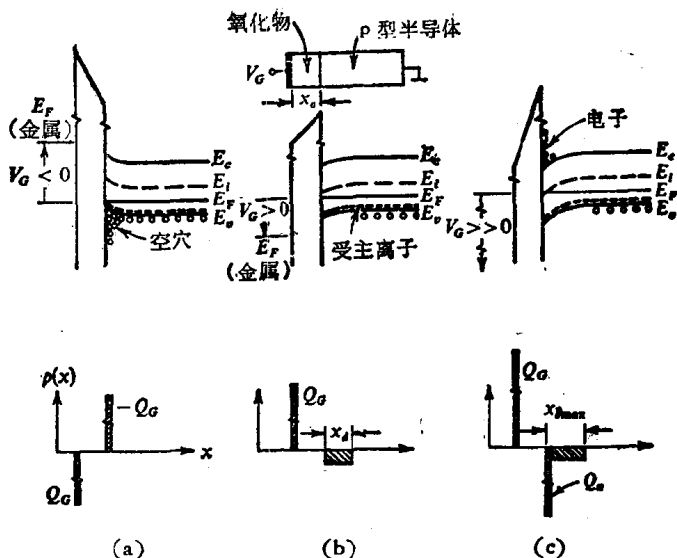


图 1.2 各种偏置条件下理想 MOS 结构中的能带和电荷分布。(a) 表面附近多数载流子堆积；(b) 多数载流子耗尽；(c) 反型

消,如图 1.2(b) 所示。

现在开始增加正的栅电压,起初表面耗尽区宽度也随之增加,能带进一步弯曲。然而,当能带弯曲到使界面处禁带中线 E_i 与费密能级 E_F 相遇、甚至低于 E_F 时,界面邻近的电子浓度将遽然增加,明显超过空穴浓度,形成极薄的 n 型反型层。到了这种状态,耗尽层宽度基本上不再继续增加,因为如果继续增加栅电压,耗尽层宽度仅需增加一点(相应于能带再弯曲一点)便能使反型层中电子大量增加。这种状态可以称为强反型,出现强反型的条件通常取为

$$\phi_s \approx 2 \frac{E_i - E_F}{q} = 2\phi_F,$$

其中 ϕ_s 是表面势,相应的栅电压是开启电压 V_{th} 。当栅电压逐渐增加时,P 型硅中的电子是从哪里来的呢? 反型层中电

子是依靠半导体的复合-产生机构逐步产生以保持半导体的热平衡状态。

我们强调指出,通过复合-产生机构恢复平衡的过程需要一定时间,而且与其它一些过程相比,复合-产生过程的时间常数不算小。如果不是逐渐增加栅电压,而是对栅极加阶梯电压 $V_G > V_{th}$, 那末,半导体将处于非平衡状态,耗尽层将超过热平衡状态的最大宽度,此时称为深耗尽。图 1.3(a) 是对一个氧化层厚度 $0.1\mu\text{m}$ 、受主杂质浓度 10^{21}m^{-3} 的 MOS 结构加 +10V 栅压的深耗尽情况。耗尽层宽度约 $3.3\mu\text{m}$, 栅压的大部分(大约 8.5V)降在耗尽层上。

如果栅压保持为 +10V, 贴近界面的耗尽层将随着电子的积累而逐渐发展为反型层。这些电子可能从周围注入, 但

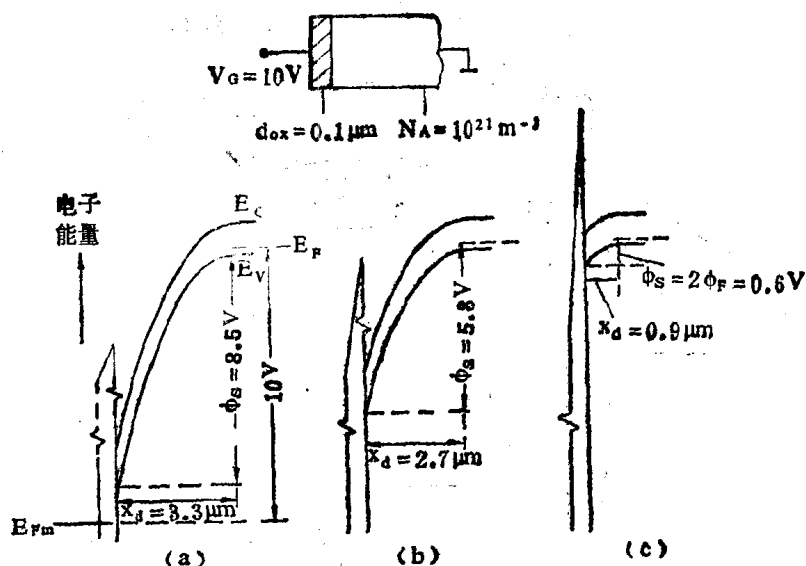


图 1.3 栅压为 10V 的 MOS 结构能带图。(a) 势阱中没有电荷;(b) 势阱大约填充至 1/3;(c) 势阱完全填满——热平衡(图上氧化层厚度扩大了 5 倍)

是,复合-产生中心肯定不断地提供电子。随着电子积累,耗尽层将变窄,表面势将降低,这意味着氧化层上压降增加。深耗尽层的形成是 CCD 工作的基础。我们在上面提到的势阱,就是指深耗尽条件下的表面势。所谓势阱逐渐填满,就是电子在界面的堆积使表面势下降。图 1.3(b)是势阱大约填满 1/3 的情况,图 1.3(c) 是势阱完全填满也就是恢复了热平衡的情况。由此可见,CCD 本质上是一种非平衡器件。

若用 V_{ox} 记氧化层上压降,则有

$$V_G = V_{ox} + \phi_s, \quad (1.1)$$

ϕ_s 是界面势。令 Q_G , Q_{INV} 和 Q_D 是栅上、反型层内和耗尽层内的电荷密度,则电中性条件要求

$$Q_G + Q_{INV} + Q_D = 0. \quad (1.2)$$

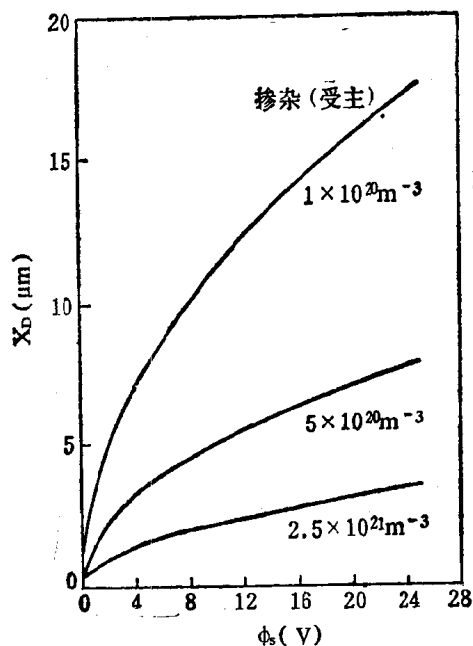


图 1.4 耗尽层宽度与表面势的关系