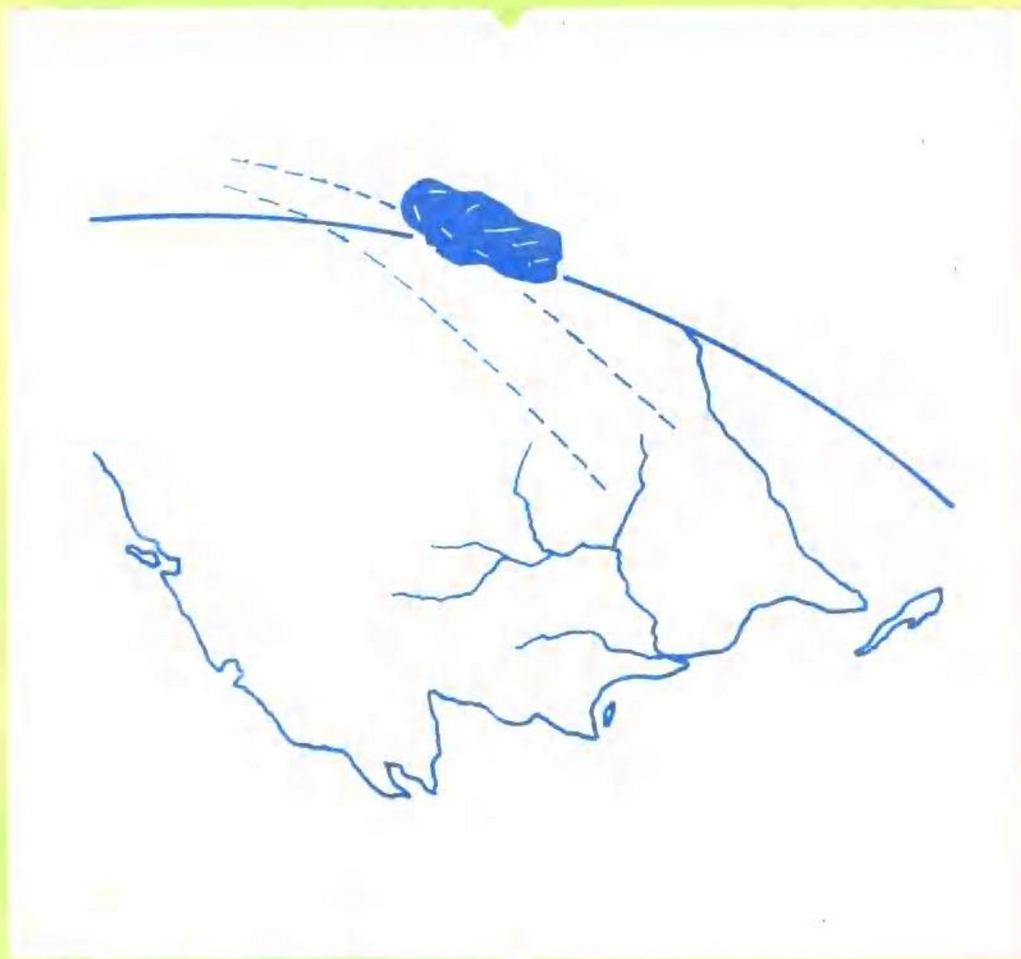


哈尔滨工业大学研究生教材

SPACE REMOTE SENSING CCD
PUSHBROOM IMAGING SYSTEM



韩心志 编

航天遥感 CCD推帚式成象系统

哈尔滨工业大学出版社

30618304

V556
05

航天遥感CCD推帚式成象系统

韩心志 编

HK41/31

822V
20

内 容 简 介

本书论述的是CCD列阵自扫描推帚式遥感成像系统,在阐明CCD自扫描列阵物理性质的基础上,给出CCD成像器件和成像系统的工作性能和工作参数、几何成像要求(如波段-波段的配准精度)、象质评价(调制传递函数MTF)、辐射度学计算和定标等内容。

本书是为光学专业的研究生和高年级本科生而编写的教材,对于从事光学遥感方面的科技人员也是一本有价值的参考书。

航天遥感CCD推帚式成像系统

韩 心 志 编

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨市外文印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 8.125 字数157 000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-5603-0298-X/V·2 定价 2.00元

研究生教材出版说明

研究生教材建设是一个长期而艰巨的任务。它不仅关系到研究生的培养质量，还关系到教师的研究成果能否系统地总结出来。因此，我们鼓励、支持和组织多年从事研究生教学、有着丰富教学和科学研究经验的教师参加研究生教材的编写工作，以促进研究生教材建设的进展，让那些学术水平较高而且急需的教材得以及时出版。

研究生教材的取材，首先着眼于当代新技术和新理论的发展，反映国内外的最新学术动态，使研究生学习之后能迅速接近当代科技发展的前沿，以适应现代化建设的需要；同时，又应该考虑到研究生必须掌握坚实的基础理论和系统知识，要求各课程教材应具有最基本的和最稳定的内容，使得研究生教材有足够的深度和广度。

研究生教材的选题、编写、编辑出版等各方面工作，虽然经过认真评审和细致的定稿工作，但就整体来看，这项工作尚属起步阶段，经验不足，缺点和错误在所难免，渴望各方面专家、学者和读者提出意见，使其不断改进和完善。

哈尔滨工业大学研究生院
哈尔滨工业大学出版社

一九九〇年五月

前 言

推帚式空间遥感传感器，是本世纪八十年代发展起来的高技术。第一颗推帚式传感器民用卫星，是法国经过整整十年的努力，于1986年2月21日发射成功的。这颗地球遥感卫星的发射成功，标志着空间光学遥感进入了一个新的时代，即新一代的推帚式传感器代替老一代的光机式传感器。

关于推帚式传感器的专著，目前国内尚未见出版。本书是在广泛搜集国内外最新资料的基础上，经过多年教学和科研的实践，编写而成的。编者期望，本书能为我国发展中的遥感事业作出微薄的贡献。

在内容上，编者力图安排得更符合本门学科发展的客观规律，并且使其体现于工程上的应用。书中首先讨论了CCD器件的物理性质。在这个基础上，讨论了CCD器件在应用上的限制和它的工作参数。在推帚应用条件下，调制传递函数(MTF)和辐射度学计算，是工程设计上两个重要的基本问题，这里给予了较充分地讨论。此外，本书还讨论了推帚式传感器中其他一些重要内容，如电子学系统和仪器可靠性评价等。这样做的目的，在于使这本书在深度上、广度上都具有相应的参考价值。书中以海洋卫星海洋彩色监视仪为例进行讨论，使讨论显得更为具体；书中给出的数据和图表，具有一定的实用意义。

本书是高等院校有关专业的研究生教材，也可以作为光学遥感专业高年级本科生的教学用书。对于从事空间光学遥感传感器研制的科技人员以及广大的卫星遥感数据用户，是一本有用的参考书。此外，本书的基本内容，对以CCD器件为基础作为过程测量和控制手段的广大科技人员，也会有所帮助。

编者深知在这个领域内耕耘太少，本书仅作为一块引玉之“砖”，奉献给我国年轻的遥感事业。不足之处，诚恳欢迎广大读者批评指正。

编 者

一九九〇年七月

绪 论

1982年7月16日,美国在西部空间一导弹中心把陆地卫星D发射入轨。本质上,陆地卫星D系统是一个完全的、不断的、高度自动化的数据搜集和处理系统,它在地球资源应用的全球遥感上向前迈出了重要的一步,并且是争取在80年代末实现地球资源观测系统实用化的一个重要步骤。具体地说,陆地卫星实用化是指系统具有投入商业应用的价值。这就要求系统具有很高的可靠性,以及提供的数据能够满足各种用户的要求。

从卫星系统的角度来看,陆地卫星D有与以往卫星不同的特点:1)轨道高度与航天飞机相吻合,一旦发生故障可以回收;2)不带磁带,利用跟踪数据中继卫星发送数据;3)采用多用途通用标准卫星星体。达到通用化的各分系统有:姿态控制、电源、通讯、数据处理以及推进系统。星体的指向精度和稳定特性均有大幅度地提高。

陆地卫星D携带的一个主要的地球观测系统,是主题测绘仪TM。TM是一台先进的多光谱扫描仪,或称地球资源传感器。该仪器的设计目的,是为了大幅度地提高陆地卫星在区别不同种类农作物和扩大探矿方面的能力。该仪器的空间分辨率、辐射测量精度和分辨率、几何保真度、光谱波段数和波段的确定,以及飞行中定标等诸方面,都远远超过了已往的同类仪器,它对人类研究植物学、地质学、水利学以及农业、林业和污染监控等方面发挥了重大作用,并成为寻找石油及其他矿物资源的有力工具。这是地球资源空间遥感技术经过十年的发展,在设计概念和技术实现方案上发生的变化。数据质量已在几个有代表性的应用领域(如农业、水利资源、地质和土地使用等)得到证实。在观测洪水、风暴灾害、地震和其他类似现象时,主题测绘仪能起到大面积的实时观测作用,并能克服一些调查上的困难。卫星数据的其他重要应用,可列举出的有:地质断层、海冰监视、辅助矿物勘探、监视水污染和绘制水深图等。

总之, TM是一种高度复杂的现代化仪器,在性能上有很大飞跃,被认为是同类传感器,即光机扫描仪的顶峰。

经过整整十年的努力,法国第一颗地球遥感卫星Spot 1号,于1986年2月21日发射成功。Spot卫星的平台,是一个多用途平台,携带着各种负有独立任务的分系统,如:姿态及轨道控制、电源、星上计算机、遥测和指令等分系统。此平台不仅可用于Spot计划,还可同时用于其他民用和军用太阳同步轨道卫星。Spot 1号是一颗复杂的卫星,整个星体包含一万多个元件,比一般通信卫星多两倍。在摄象时具有很高的瞄准精度(0.05度均方根值)和很低的剩余角速度(6×10^{-4} 度/秒)。Spot卫星最新颖之处是星上管理。卫星的工作是全自动的,全部控制(初始时序、操纵、摄象以及故障的排除)均通过星载计算机实现。专门配备的软件,可以保证卫星在某些情况下,尤其是出现故障的情况下做出“智能”反应。

Spot卫星的仪器舱配备两台可见光高分辨率摄象仪HRV。这两台扫描仪可独立操

作,也可以联合运行。

Spot 卫星的主要任务是探测自然资源,特别是农业、林业和矿物资源,以及绘制地图。它的全色图象地面分辨率为10米,主要是绘制地图,规划城市建设,了解森林、农业和土地利用情况;多波段图象的分辨率为20米,用于观察农作物和植被。此外,Spot 具有侧视能力,这种技能大大增加了对某些地区进行摄影的可达性和重要性。对于跟踪一些较快变化的现象,如庄稼的成熟度、环境变化和自然灾害等,尤为重要。同时也有利于缩短摄影的期限(避开云层的覆盖)以及在确切的时间内对一些特定的地区进行观测,这是许多应用所需要的。侧视技术还可以使 Spot 卫星进行立体摄影。

总之,Spot 卫星的图象具有非常广泛的用途:在地质学、土壤学、人种分类学、水文学、测绘学和沿岸海洋学等方面都可以得到应用。特别适用于建立农作物分布的清单、监视森林病虫害、制定城市建设和土地利用规划、估计水稻产量和沙漠的变化等,其费用只占航空摄影的十分之一。

Spot 1 号卫星遥感传感器是第一个应用 CCD 列阵推帚式成像系统的实用化传感器。

Spot 卫星与陆地卫星 D 以及其后的其他陆地卫星同时运行,其设计性能基本上能满足世界各国用户的要求。

在陆地卫星 D 大量获取改进的光谱信息的同时,Spot 卫星具备立体覆盖能力和为用户在指定地区频繁取数的能力,并可提供分辨率很高的图象。这两种系统互相补充,可获得巨大效益。

陆地卫星 D 和 Spot 1 号卫星的发射成功,是地球观测系统发展过程中的两件大事。它标志着:尽管在今后的若干年内还会发射各种不同用途的具有优良性能的光机扫描模式的地球观测系统,尽管现有的实用化推帚扫描模式的系统尚存在着某些缺陷,给卫星性能带来一定的限制(如 Spot 1 号卫星观测系统尚没有红外波段),但是作为一个时代,光机扫描模式的观测系统已让位于推帚扫描模式的系统了。这是一种合乎逻辑的发展和自然趋势。事实上,早在发射陆地卫星 D 以前,美国宇航局就开始规划并着手研制多光谱线列推帚式扫描仪了。Spot 1 号卫星观测系统使用的 CCD 线列阵器件,是由美国提供的。美国宇航局的多光谱线列阵规划,即 MLA 规划,对发展和验证先进的固态传感器的原理,以及开展遥感研究工作,都作了详细安排,其技术发展和航天飞机飞行的结果,将成为确定九十年代新一代遥感传感器的依据。

新一代地球观测遥感系统,将围绕着新的原理和技术发展。这些原理和技术包括:新一代混成式和单片式多光谱红外和可见光电荷耦合器件推帚模式列阵、全反射宽视场光学系统、内在配准的先进的光谱分光技术和星上数据压缩技术。

目 录

绪 论	I
第一章 CCD器件的基本物理性质及其在摄象中的应用	1
第一节 MOS的物理性质	1
一、稳态情况	2
二、瞬态情况	3
三、自由载流子的复合和产生	3
四、表面态	3
五、存贮时间	4
第二节 电荷耦合器件工作的基本原理	4
一、电荷处理容量	6
二、电荷耦合	6
三、电荷传输	6
四、表面态对传输损失率的影响	6
五、暗电流	6
六、埋沟 CCD 器件	7
第三节 CCD器件在摄象中的应用	7
一、光信号注入与CCD摄象	7
二、CCD线阵摄象器	8
三、面阵摄象器	9
四、电荷注入器件 (CID) 图象传感器	10
五、低亮度摄象	11
六、红外摄象器	11
第四节 CCD摄象器件的性能限制	12
一、调制传递函数和乱真	12
二、饱和限制和象晕控制	13
三、微光条件下的限制	14
四、干涉效应	14
第五节 CCD摄象器件的工作参数	14
一、光谱响应特性	14
二、调制传递函数	15
三、辐射度学参数	15
四、暗输出 V_d	16

五、不均匀性	16
第二章 推帚式扫描遥感传感器	17
第一节 推帚式扫描传感器的特点	17
一、多光谱线列阵传感器的发展	18
二、MLA 传感器线列阵	20
三、MLA 传感器面列阵	22
第二节 MLA 传感器光谱波段的确定	24
一、多光谱遥感最佳波段选择的一般原则和制约条件	24
二、飞行使命决定的光谱波段选择	25
三、海洋遥感的光谱波段选择	26
第三节 CCD 遥感系统的象质	29
第四节 推帚式传感器MTF的讨论	30
一、光学系统的调制传递函数	30
二、CCD 列阵推帚式工作的MTF	30
第三章 推帚式扫描遥感传感器的辐射度学计算	34
第一节 卫星遥感观测的几何条件	34
第二节 大气模式	35
一、Deschamps 大气模式	35
二、结果示例	37
第三节 辐射度学计算	37
一、反射波段的辐射度学计算	38
二、中远红外波段的辐射度学计算	41
第四节 光学系统相对孔径的确定	42
一、辐射度学 ($f'/D \max \text{ rad}$)	42
二、衍射 ($f'/D \max \text{ diffs}$)	43
三、象差 ($f'/D \min \text{ design}$)	44
四、饱和 ($f'/D \min \text{ sat}$)	44
五、非临界情况	46
第五节 辐射度学计算中的几个重要因素	46
一、象元尺寸	46
二、孔径尺寸	46
三、偏振	46
第六节 阳光闪烁及其避免	47
一、阳光闪烁	47
二、阳光闪烁分析	48
三、避免阳光闪烁的原理	49
四、阳光闪烁作为测量的参数	49
第四章 推帚式传感器的光学系统	50

第一节 推帚式光学系统性能的基本要求	50
第二节 望远镜光学系统设计方法	54
一、折射式	54
二、折反射式	54
三、反射式	55
四、大孔径红光光学系统设计	57
第三节 光谱分离	61
第四节 象元的空间相互配准	62
一、基准象	62
二、象元的相互配准	64
第五节 总视场覆盖方案	68
一、两分总视场方案	69
二、三分总视场方案	70
三、其它方案	71
第六节 焦平面组合	72
一、焦平面组合	73
二、焦平面调整	74
第五章 传感器的星上定标	76
第一节 定标的要求	76
第二节 飞行中定标的基准源	77
一、月亮	77
二、星体	77
三、灯	78
四、统计定标	78
五、太阳	78
第三节 最佳定标原理的选择	79
第四节 透射和反射定标方法的比较	81
第五节 散射器监视器原理设计	81
第六节 定标参数的地面特性	83
一、散射器参数的规定和测量	83
二、散射器监视器参数的规定和测量	87
三、仪器参数的规定和测量	88
四、规定的参数对仪器原理设计的影响	89
第七节 Spot HRV的绝对定标	90
第六章 传感器的电子学系统	92
第一节 信号规一化	93
第二节 电子学系统原理总论	93
一、成象电子学系统	93

二、操作模式.....	95
三、传感器驱动和模拟读出电子学系统.....	95
四、数字电子学系统.....	96
第三节 电源.....	105
第七章 几个重要的设计问题.....	107
第一节 技术系统选择准则.....	107
第二节 机械结构和热控子系统.....	107
第三节 热控分析和设计.....	108
一、概论.....	108
二、热控原理.....	108
三、小室间的热交换和辐射器的要求.....	108
四、辐射器的位置和尺寸.....	109
五、热畸变评价.....	109
第四节 可靠性评价.....	110
第五节 寿命和可靠性考虑.....	112
第六节 某些进一步的工作.....	114
一、星上定标.....	114
二、CCD 器件.....	114
三、球面上的干涉滤光镜.....	115
参考文献.....	116

第一章 CCD器件的基本物理性质 及其在摄象中的应用

CCD, 即电荷耦合器件, 提供了新的器件概念。因为电荷耦合器件的基本参数是电荷, 而不是电流和电压, 这就在各种电路和信息处理系统中引进了有诱惑力的新概念。

电荷耦合器件本身就是一种模拟器件, 因而用于许多取样数据信号处理是很理想的, 可能直接在模拟范围内完成许多取样数据的滤波功能。就某种意义上说, CCD兼有数字和模拟技术的最佳特点。迄今为止, 已经实现的CCD模拟信号处理器件, 按功能可分为五大类:

- 1) 模拟延迟。在取样频率 f_s 下, 对输入波形进行取样, 并有延时 T_d 。
- 2) 多路转换。多路信号并行输入CCD寄存器中, 然后串行读出。
- 3) 横向(有限脉冲响应)滤波。从CCD的若干点做出非破坏性的抽头, 并把各抽头的信号乘以权重因子后叠加形成输出信号。
- 4) 递归滤波。与横向滤波器一样, CCD也从各点抽头, 但加了权重后的输出要反馈到CCD输入端。
- 5) 相关。对二个模拟波形的卷积。

上述每一种器件都可以视为一个信号处理积木块。这种积木块适当组合可以完成复杂的模拟信号处理功能。

CCD也可以用于数字存贮器, 从而提供了一种先前没有的新技术, 其实质是一种动态串行存贮器。它在可靠性、积木块特性以及在取数时间和转移速度等方面都有优点。

电荷耦合原理能够用于摄象器件, 从CCD器件一问世, 人们就认识到开创这种全新技术的可能性。就是说, 一旦在CCD电极下形成势阱, 在一定波长的入射光照射下, 就会在该势阱中产生少数载流子, 其数目与入射光辐照度和光照的时间成正比。这种固体图象传感器具有功耗低, 轻便以及坚固等电子束真空摄象管所没有的优异性能。它把光电转换机能、信号存贮机能以及扫描(信号读取)机能都合并在一起了。

此外, 这种器件还具有寿命长和弱光下灵敏度高的优点, 不易受“滞后”或拖影的影响, 这两点是其他类型的电视摄象管性能退化的重要原因。

所有以上这些应用和特点, 使得这种器件在遥感中占有重要地位。

第一节 MOS的物理性质

本质上, 电荷耦合器件是一般MOS电容器的一种新用法。因此, 首先介绍MOS电

容器的物理性质，特别是与电荷耦合器件工作有关的物理性质。正是这些物理性质，决定了CCD器件的应用上的特点以及性能上的某些限制，特别是在摄像上的应用和限制。

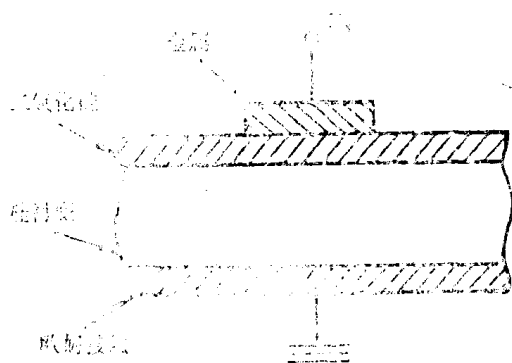


图 1-1 MOS 结构示意图

MOS结构，即由金属（M）—氧化物（O）—半导体（S）三层组成的MOS电容器，构造如图1-1所示。一般以硅作半导体衬底，其上热生长一层二氧化硅，在二氧化硅上淀积具有一定形状的金属层，并在硅片底部形成一个欧姆接触层。在金属层和硅片底部的欧姆接触层之间施加外电压 V_g 。

一、稳态情况

当以半导体，即衬底为基准，在金属电极上加一负的直流电压时，在二氧化硅和硅的界面上就会积累自由空穴。这种状态称为“积累状态”。交流小信号叠加在加有负的直流偏压的金属电极上时，在氧化层中引起位移电流。界面上积累的空穴数量随交流信号发生变化。对于硅，界面上积累的空穴对交流信号的响应时间 τ ，数量级为 10^{-12} 秒。因此，在积累状态下，可视半导体为金属板。

如果把小的正电压加到金属板上，在半导体表面感生出负电荷。这种负电荷由失去空穴的离化受主杂质提供。由于半导体单位体积内的受主杂质数量是固定的，在界面下则形成一定宽度没有可动空穴的带负电的区域，称为“耗尽区”或“空间电荷区”。这时，MOS电容器处于“耗尽状态”。耗尽区有电势分布，在界面处的电势称为“表面势”。如果交流小信号叠加在加有正直流电压的金属板上，耗尽区宽度随交流信号的变化而变化。

当表面势增加时，电子密度也增加。在耗尽状态，耗尽区中电子和空穴的浓度与受主浓度相比可略而不计。但表面势如进一步增大，界面附近的电子浓度继续增加，其电子浓度与受主浓度差不多。界面上的电子层称为“反型层”。当界面出现反型层时，MOS即处于“反型状态”。界面电子浓度正好等于衬底受主浓度的那一点，称为“强反型开始”。一旦反型开始，随着栅电压进一步增加，金属板上正电荷的增加由反型层中电子的增加来平衡，耗尽区宽度几乎保持不变。在加有直流电压的金属板上叠加小交流信号时，反型层中电子数目不随交流信号变化，即MOS的电容是恒定值。如果交流信号的频率足够低，例如，在100赫兹以下，电子数目可能随交流信号变化。

MOS电容器的上述特性概括于图1-2的曲线a)中。曲线表示栅电容是栅电压的函数。强反型开始时的栅电压称为MOS电容器的“阈值电压” V_{th} 。

图中， C_g 为栅电容； C_{ox} 为单位栅面积的MOS结构的电容。这些讨论都基于一个假定，即栅压为零时，半导体中的能带是恒定的，即能带是平的。在实际的MOS结构中，在栅电极上必须加一定的电压才能使半导体处于平带条件。此电压称为平带电压

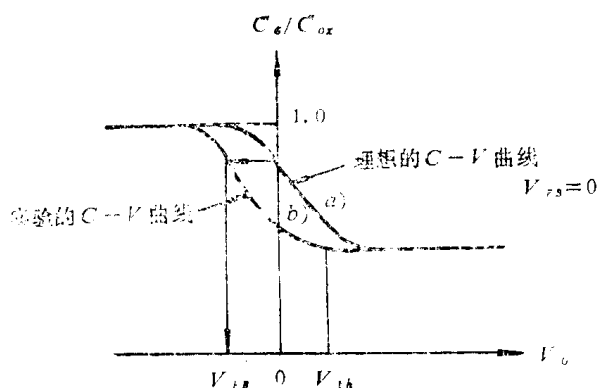


图1-2 MOS电容器的C-V特性

V_{FB} 。把理想的C-V曲线a)沿电压轴移动一个 V_{FB} 值,就可以修正为实际的曲线b)。

二、瞬态情况

讨论稳态情况时,加到MOS栅上的是一个直流电压和一个小的交流信号。瞬态情况是讨论在脉冲激发下MOS电容器的特性。电荷耦合器件是由许多用脉冲激发下工作的MOS电容器组成的。

设一个负电压或小于平带电压的电压加于N沟MOS电容器的栅上已很长时间,使MOS电容器处于积累状态。如果在 $t = 0$ 时把一个大于阈值电压的正电压加到栅电极上,则自由空穴从界面上被逐走,形成耗尽区,然而还没有形成反型层。因电子-空穴对的热产生过程需要一定的时间才能供给形成反型层所需要的电子,此时MOS电容器处于“深耗尽状态”。耗尽区的宽度比反型层宽度大得多。事实上,可以把深耗尽理解为栅电压超过阈值电压时,电容器继续处于耗尽状态。

随着时间增加,在界面形成反型层,达到稳态。此时净产生率为零。

三、自由载流子的复合和产生

对于MOS电容器,在直流偏压下,它的衬底处于热平衡状态。然而在脉冲激发下,衬底不再处于热平衡状态,存在一个使衬底回到热平衡状态的过程。此过程正是载流子的复合和产生过程。

金属杂质或晶体缺陷会在禁带中引进能级,这些能级称为“陷阱”。载流子的复合和产生能够通过这些能级发生。导带电子被陷阱俘获的几率与导带中的电子浓度和空穴陷阱密度成正比;陷阱电子从陷阱发射到导带的几率与满陷阱数目成正比。空穴的俘获过程与满陷阱密度成正比;空穴的发射过程却与空陷阱密度成正比。处于稳态条件下的MOS电容器,净复合率为零。在瞬态情况下,深耗尽时净复合率为负值。因此,当陷阱在禁带中有一定分布时,只有能量处于禁带中央附近的陷阱,才对复合-产生有意义。

四、表面态

在硅—二氧化硅界面上,晶格结构的周期性破坏,使界面附近的禁带中产生了高密度能态,称为“表面态”或“界面态”。如果在MOS电容器上加一个直流电压,表

面态能级随着表面势一起上升和下降，而费米能级保持不动，从而引起表面态电荷的变化，反过来又导致 $C-V$ 曲线的畸变。

五、存贮时间

MOS电容器从深耗尽状态达到反型状态所需要的时间，称为存贮时间 τ_s 。存贮时间可以长达几分钟。为得到长的存贮时间，必须采用以下方法：

1. 降低体产生中心数目；
2. 降低表面态数目；
3. 降低温度；

第二节 电荷耦合器件工作的基本原理

简单的电荷耦合器件，是紧靠着的但是带有间隙的MOS电容器阵列。图1-3表示一个三相二位N沟CCD器件。六个MOS电容器（或电极）分别连到时钟线 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 ，构成CCD主体。输入二极管（ID）、输入栅（IG）构成输入结构，把电荷包输入到CCD主体中；输出二极管（OD）和输出栅（OG）构成输出结构，检出从CCD出来的电荷包。围绕有源区的 p^+ 扩散区，是为防止 p 型硅衬底的反型而设。两个 ϕ_2 电极和 ϕ_2 时钟线的联接，靠 n^+ 扩散区的地道实现。把输入结构和输出结构与CCD主体结构做在一起，构成多栅MOS晶体管器件。

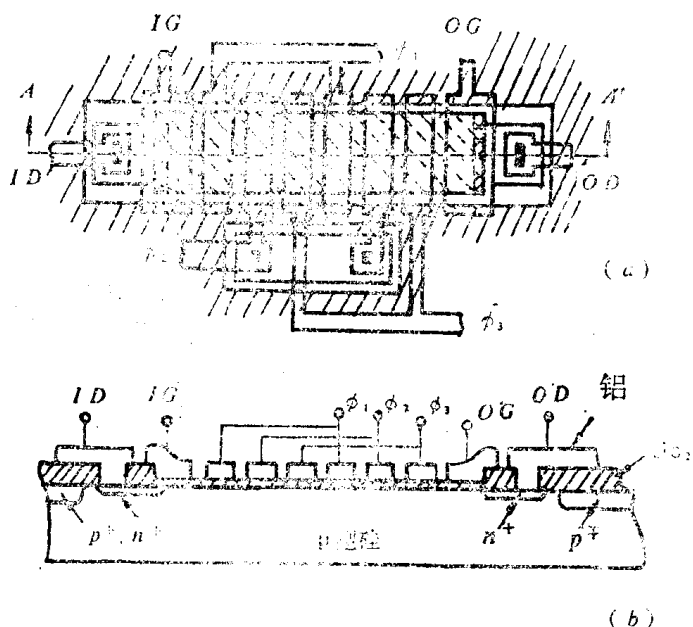


图 1-3 三相二位N沟电荷耦合器件

(a) 器件版图设计 (b) 沿A-A'的截面图

加在这些电极上的电压决定。由于深耗尽状态的MOS电容器表面没有可动电子，表面势与栅压近似成线性关系。因此，各 ϕ_1 电极下的表面势将较 ϕ_2 和 ϕ_3 诸电极下的表面

利用图1-4可以说明这个器件的工作原理。此图表示时钟波形和器件内部的电势及电荷分布。在 $t=t_1$ 时， ϕ_1 处于高电压，大于阈值，而 ϕ_2 和 ϕ_3 处于低电压。此时在输入二极管（ID）和输出二极管（OD）都加高的正偏压，以避免输入栅、输出栅底下的表面发生反型。如此，输入和输出栅底下的表面处于深耗尽状态，输入、输出二极管也不可能给CCD主体阵列提供电子。结果六个MOS电容器也处于深耗尽状态，其表面势由

势高。

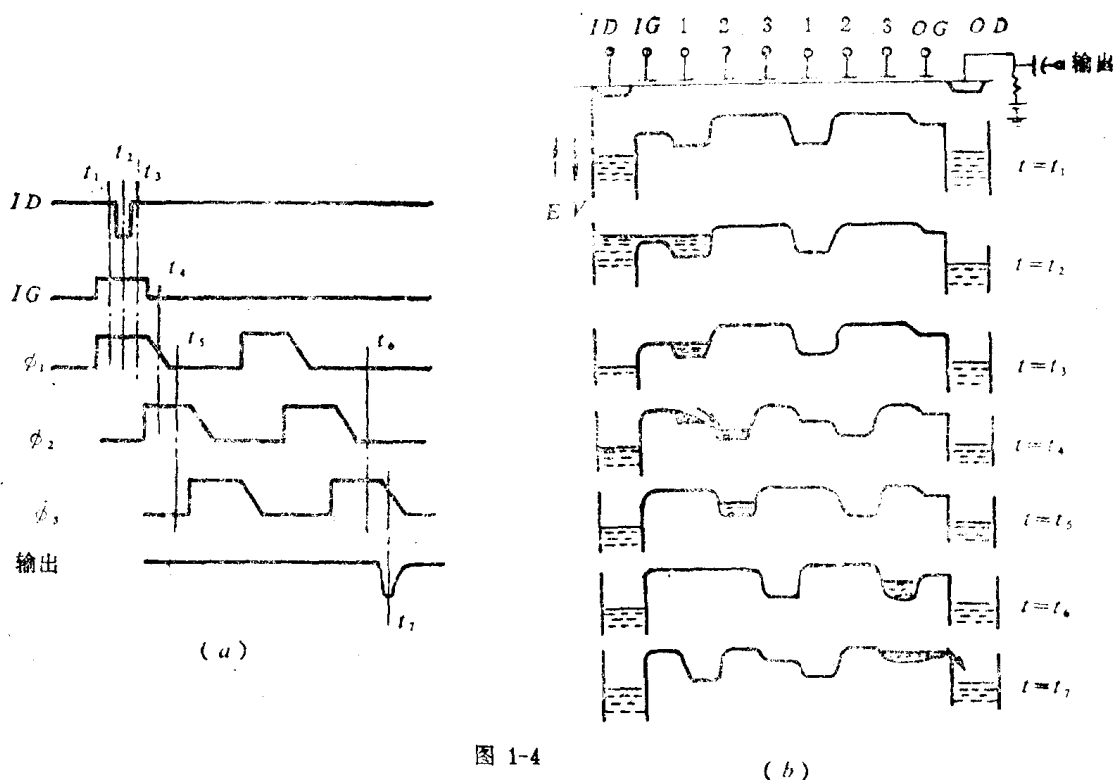


图 1-4

(b)

(a) 图 1.3 所示的器件的时钟波形和输出信号 (输出栅和输出二极管加直流偏压)

(b) 图 1.3 所示的器件的电势和电荷分布图 (其时钟波形示于图 1.4(a))

如果两个电极之间的距离, 即间隙长度足够地小, 那么从 ϕ_1 电极下的高表面势到 ϕ_2 或 ϕ_3 电极下的低表面势之间的转变是平滑的。这使每个 ϕ_1 电极下面都出现势阱, 如图 1-4 (b) 所示。如果器件长时处于这种状态, 热产生的电子被收集在这个势阱中, 形成贮存在 ϕ_1 电极下一定区域里的电荷包。但 CCD 正常工作时的时钟频率 (即 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 的脉冲重复频率) 足够高, 以致热产生电子与信号电荷相比完全可以忽略。在 $t=t_2$ 时, 信号电荷输入器件。这时, 输入二极管的电压降低, 使二极管的电势处于输入栅的表面势和 ϕ_2 电极下的表面势之间的某一个值。因此出现了一个低电势区, 电子穿过输入栅流入到 ϕ_1 电极下的势阱中。电子注入结束时, 输入栅和第一个 ϕ_1 电极下的表面势变为与输入二极管电压相同。此时电子存贮在输入栅和第一个 ϕ_1 电极下。在 $t=t_3$ 时, 输入二极管的电压恢复到高电压, 而输入栅下的电子和 ϕ_1 电极下的多余电子通过输入二极管引线流出器件。于是在第一个 ϕ_1 电极下产生了一个电荷包。电荷包的大小与输入栅下的表面势和第一个 ϕ_1 电极下的表面势之差成正比。第一个 ϕ_1 电极下的表面势, 在注入结束时与输入栅下面的表面势相同, 这是因为可动电子的存在降低了表面势。确定电荷包大小的 ϕ_1 电极下的表面势是没有可动电子时的表面势。当 $t=t_4$ 时, 所有 ϕ_1 电极都恢复到低电压, 而所有 ϕ_2 电极都加高电压。存贮在第一个 ϕ_1 电极下的电子就转移到第一个 ϕ_2 电极。此过程即电荷传输。当然, 只有在间隙长度足够小时才有良好的电荷传输。在 $t=t_5$ 时, 电荷传输过程结束, 电荷包移至第一个 ϕ_2 电极下面。重复此传输过程, 在 $t=t_6$ 时, 注入的电荷包存贮在第二个 ϕ_3 电极下面。在 $t=t_7$ 时, ϕ_3 电极的电压降低, 并把电子赶到输出二极管

中, 给出一个与电荷包大小成正比的输出信号, 如图1-4 (a) 的输出波形。

综上所述, CCD是一种以电荷包的形式存贮和传输信息的器件。

一、电荷处理容量

许多电子被收集在势阱的表面时, 表面势变低。在图1-4的三相CCD中, 在加高压的电极下形成的势阱里, 可不断地加入电子, 直到使这个势阱的表面势和加低电压的邻近电极下的表面势相等为止, 即在

$$V_s(V_H, Q_{sat}) = V_s(V_L, 0)$$

时, 势阱被电子填满。式中, V_H 和 V_L 分别为时钟的高电平和低电平; Q_{sat} 为填满势阱时所存贮的电荷; $V_s(V_G, Q)$ 是表面势, 是栅电压 V_G 和存贮在栅下的电荷 Q 的函数。

二、电荷耦合

电荷耦合器件工作的质量与金属电极之间的间隔关系非常灵敏。对于大多数电荷耦合器件, 间隙长度小于1微米已是足够小的了。允许的最大间隙长度, 应保证间隙区有光滑的表面势变化。

三、电荷传输

对于两个靠得很近的MOS电容器 A 和 B , 如果控制栅电压使其间的电荷传输过程在时刻 T 结束, 将有部分电荷留在电极 A 下。传输到电极 B 的电荷与电极 A 底下的初始电荷之比, 称为“传输效率” η , 即

$$\eta = 1 - \frac{N(T)}{N(O)}$$

式中, $N(T)$ 是 $t=T$ 时留在电极 A 底下的总电荷量; $N(O)$ 是电荷传输过程刚刚开始之前存贮在电极 A 底下的总电荷量。与传输效率相关的概念是“传输损失率” ϵ ;

$$\epsilon = 1 - \eta$$

自感生电场漂移、边缘场漂移和热扩散, 是三个基本的电荷传输机构。在自由电荷传输模型中给定器件的传输损失率是时钟频率的函数。

四、表面态对传输损失率的影响

对表面沟道电荷耦合器件, 在中频工作时, 在硅—二氧化硅界面上存贮和传输的信号载流子和表面态的相互作用限制了器件的性能。

五、暗电流

在全暗条件下, 由热产生的载流子形成的电流, 称为“暗电流”。在CCD器件的摄像应用中, 不均匀的暗电流成为主要问题。暗电流尖峰成为实际应用中最为讨厌的固定图样噪声。把暗电流积累的电荷和饱和电荷加以比较, 可估计电荷耦合器件的低频极限。