

TN386.5
4405

964223

CCD技术及应用
出版年：1997
ISBN：7-5053-1000-0

CCD

技术及应用

● 蔡文贵 李永远 许振华 编 著



● 电子工业出版社

CCD 技术及应用

蔡文贵 李永远 许振华 编著

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

CCD(Charge Coupled Devices),即电荷耦合器件,是一种新型的固体成像器件,是近代光电成像领域里非常重要的一种高新技术产品。作为一种先进的图像传感器,CCD 器件具有灵敏度高、光谱响应宽、动态范围大、操作容易、维护方便、成本低廉、易于推广等优点。在国防、公安、宇航、天文、地质、生物、医疗、教育、工业自动化等技术和科学领域里,具有广泛的应用价值和前景。

《CCD 技术及应用》一书,以实用 CCD 技术为主要内容,深入浅出地阐述了 CCD 的结构、工作原理,力求详尽地列举了相关的性能参数,图文并茂地说明了 CCD 线阵摄像机的设计方法和应用范围,并介绍了这一高新技术的最新发展动态和水平。

本书对从事 CCD 光电成像器件和整机研制、开发、应用和营销的工程技术人员和管理人员,很有参考价值。

CCD 技术及应用

蔡文贵 李永远 许振华 编著

责任编辑 王昌铭

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

北京市燕山联营印刷厂印刷

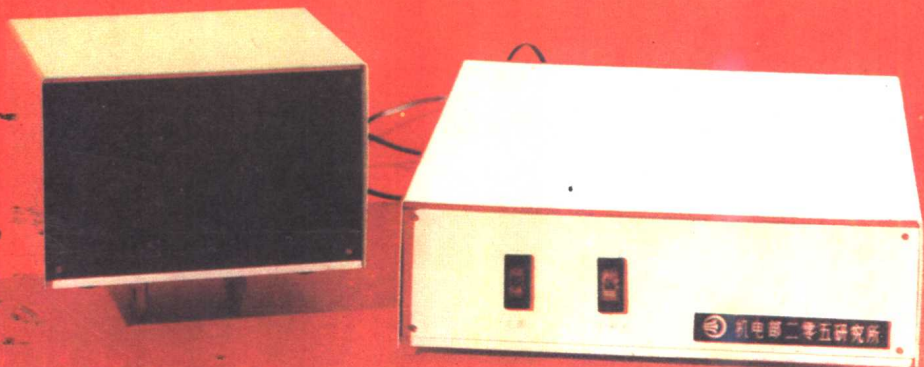
*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:10 字数:256 千字

1992 年 11 月第 1 版 1992 年 11 月第 1 次印刷

印数:7000 册 定价:6.50 元

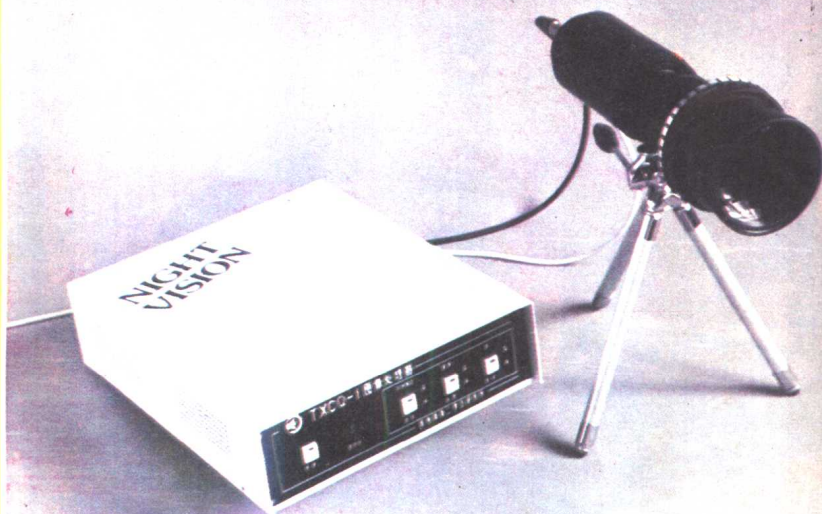
ISBN7-5053-1807-1/TP·421



①



③



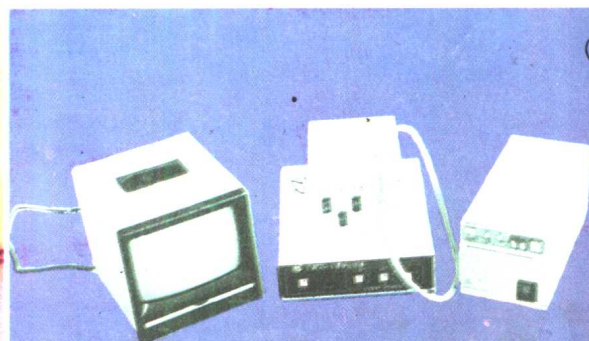
②



⑤



④



⑥

前 言

CCD(Charge Coupled Devices),即电荷耦合器件,是一种新型的固体成像器件,它是在大规模硅集成电路工艺基础上研制而成的模拟集成电路芯片。这种 CCD 芯片借助于必要的光学系统和合适的外围驱动与处理电路,可以将景物图像,通过输入面空域上逐点的光电信号转换、储存和传输,在其输出端产生一时序视频信号,并经末端监视器同步显示出一幅人眼可见的图像。所以,CCD 首先是一种微型图像传感器,其次,它还可以用于模拟信号处理、数字信号储存等技术领域。

这种新型光电成像器件于 1970 年首先在美国研制成功。它一问世,就显示出灵敏度高、光谱响应宽、动态范围大、操作容易、维护方便、成本低廉、易于推广等一系列优点。因而,一直受到人们的普遍重视,发展异常迅速。至今已在国防、公安、工业、医学、生物、天文、地质、宇航等技术和科学领域得到广泛应用。

CCD 从结构上讲,可分为线阵和面阵 CCD 两种。在绝大多数领域里,面阵 CCD 已取代了普通的光导摄像管。在图像记录储存方面,美国 koda(柯达)公司已经推出了分辨率为 128×128 、每秒可读取 4 万幅画面的面阵 CCD 器件。线阵 CCD,作为一种高灵敏度光电传感器,在工业生产线上,用于产品外部尺寸非接触检测、控制和分类,产品表面质量评定,自动化及机器人视觉中的精确定位等。

我国 CCD 技术的应用尚处于初始阶段。为了让更多的读者了解 CCD 器件结构、工作原理、性能评价、总体应用、市场开拓及其最新发展动态和水平的情况,我们编著了《CCD 技术及应用》一书,供读者学习、设计和使用 CCD 产品时参考。

全书共包括六大部分:

- 一、固体摄像器件
- 二、线阵 CCD 摄像机及其应用
- 三、面型 CCD 摄像机及应用电视系统设计
- 四、特种电视
- 五、光学系统原理及典型光学系统特性
- 六、电视图像信号处理。

编著本书以促进 CCD 系统在国内的发展和应用为目的,以实用 CCD 技术为主要内容,深入浅出地阐述了 CCD 的结构原理,力求详尽地列举了相关性能参数,图文并茂地说明了 CCD 摄像机的设计方法和应用范围,简明扼要地介绍了微光 CCD 和红外 CCD 等高新技术的特点和发展动态。对于各类摄像系统所需的摄像物镜性能和选配方法,也给予一定篇幅的说明。最后,还专门评述了旨在提高图像质量的电视图像处理技术的内容、方法和若干实用产品。

机电部 205 所是我国从事光电成像器件及系统开发的专业研究所,她位于历史名城西安高新技术开发区内(电子城紫薇路 1 号),有职工 1000 余人,高级科技人员 110 名,工程师和其它科技人员近 600 名,设有十一个专业研究室、一个光学一级计量站,一个光、机试制工厂,主要从事光电子技术及系统工程的应用研究和新产品开发工作。在 CCD 技术和应用,以及微光、光纤、激光、红外、制导、跟踪、计量和薄膜光学等光电成像诸领域里,具有较雄厚的实力和较先

3A016/05

进的水平。本书内容主要是该所多年来从事 CCD 技术研究、开发、应用成果的结晶。我们愿和全国的 CCD 技术及应用界的同行,取长补短,相互切磋,为我国光电成像学科的繁荣和发展共同做出新的贡献。

在本书编辑出版过程中,得到了很多同行、同事的启发、研讨和帮助,本所研究员级高级工程师向世明同志仔细地对全书手稿进行了技术和文字上的审校。北京理工大学李士贤副教授对部分章节进行审校。在此一并致谢!

时间仓促,水平有限,错误和遗漏之处,恳请同行专家和读者们批评指正。

编著者:1992 年 9 月于机电部 205 所

目 录

第一章 固体摄像器件	(1)
第一节 CCD 基本概念和特点	(1)
第二节 CCD 器件的基本结构和工作原理	(2)
一、光电转换、储存	(2)
二、光荷转移	(4)
三、电荷读出	(5)
第三节 CCD 器件的性能参数	(6)
一、光电转换特性与响应度	(6)
二、光谱响应	(9)
三、饱和输出电压 V_{SAT}	(10)
四、光响应非均匀性	(10)
五、分辨率	(10)
六、噪声	(12)
七、信噪比与动态范围	(12)
八、暗电流	(14)
九、纹波效应	(14)
十、固体摄像器件中的缺陷	(15)
第四节 线型 CCD 摄像器件	(16)
一、单沟道线型结构 CCD	(16)
二、双沟道线型结构 CCD	(17)
第五节 面型 CCD 器件	(27)
一、帧转移 CCD 摄像器件	(27)
二、行间转移结构 CCD 摄像器件 (ILT-CCD)	(28)
三、两种面型结构 CCD 器件的比较	(31)
第六节 CCD 图像传感器的发展方向	(32)
第二章 线阵 CCD 摄像机及其应用	(35)
第一节 线阵 CCD 摄像机	(35)
一、线阵 CCD 摄像机的组成和工作原理	(35)
二、CCD 图像传感器的选择	(36)
三、CCD 工作参数设计	(36)
四、视频信号处理电路设计	(38)
第二节 CCD 测量系统的组成和参数标定	(39)
一、照明光源	(39)
二、光学系统参数的选择	(40)
三、系统参数的标定方法	(41)

第三节 线阵 CCD 摄像系统的应用	(42)
一、采用衍射法测量小孔或细丝直径	(42)
二、平行光成像尺寸测量法	(44)
三、采用成像法测量中等尺寸目标	(44)
四、采用双光路成像法测量大尺寸	(45)
五、采用激光三角法测量不透明物体的厚度	(46)
六、光学系统自动聚焦	(47)
七、眼球瞳孔动态响应测量	(47)
八、文字和图像识别	(48)
九、传真应用	(49)
十、光谱测量	(49)
十一、航空和航天遥感摄影	(50)
十二、质量检测	(50)
十三、其它应用	(51)
十四、实用测量系统简介	(51)
第三章 面型 CCD 摄像机及应用电视系统统计	(55)
第一节 面型 CCD 机发展概况	(55)
第二节 摄像机的构成及工作原理	(55)
一、光导管摄像机	(55)
二、CCD 黑白摄像机	(63)
三、单片式彩色固体摄像机	(67)
四、彩色 CCD 摄像机	(72)
五、三片式 CCD 彩色摄像机	(73)
第三节 应用电视系统设计	(75)
一、应用电视系统的分类	(75)
二、系统的组成设备	(77)
三、应用电视系统中摄像机、监视器的选配	(79)
四、控制器	(81)
五、应用电视系统的同步	(84)
六、视频信号的传输	(85)
第四章 特种电视	(87)
第一节 微光电视	(87)
一、微光电视发展概况	(87)
二、微光电视系统	(89)
三、微光 CCD 摄像器件	(93)
第二节 红外电视	(102)
一、主动红外电视	(102)
二、被动红外电视	(103)
第三节 X 光电视	(106)
一、X 光像增强器	(106)
二、医用 X 光电视系统	(109)

三、工业用 X 光电视系统	(110)
第五章 光学系统原理及典型光学系统特性	(111)
第一节 光的基本概念及光度量单位	(111)
一、光的基本概念	(111)
二、视见函数、光度量及其单位	(112)
第二节 光学系统成像概念	(114)
第三节 理想光学系统的物像关系	(115)
一、理想光学系统	(115)
二、理想光学系统的基点、基面	(116)
三、理想光学系统的物像关系	(117)
四、放大率	(120)
五、组合光组构成的理想光学系统	(122)
第四节 光学系统中光束限制及系统分辨率	(124)
一、光学系统中光束的限制	(124)
二、光学系统的分辨率	(127)
第五节 系统像面光照度及光能损失	(128)
一、成像系统像面光照度	(128)
二、光通过光学系统的光能损失	(130)
第六节 摄像物镜系统	(131)
一、定焦摄像物镜系统	(131)
二、变焦距摄像物镜系统	(131)
三、摄像物镜焦距的选择	(133)
四、相对孔径的选择	(134)
五、视场 2ω	(134)
六、摄像物镜像质要求	(134)
第七节 微光物镜、中继透镜、显微物镜	(135)
一、微光物镜	(135)
二、中继透镜	(135)
三、显微物镜	(136)
第六章 电视图像信号处理	(138)
第一节 电视图像信号处理的内容	(138)
一、用于改善电视图像信号处理的内容	(138)
二、用于适应信号的传输通道和压缩图像信号传送频带(或数码率)的处理	(138)
三、用于实现各种电视设备的配合及特殊效果的处理	(139)
四、用于使设备功能稳定及各种自动控制的处理	(139)
五、用于图像的增强、恢复、检测和识别等功能的处理	(140)
第二节 电视图像处理方法	(140)
一、杂波降低技术	(140)
二、轮廓增强技术	(142)
第三节 数字图像处理	(143)
一、数字图像处理的发展概况	(143)

二、图像表示	(144)
三、数字图像处理内容及系统	(145)
附录一 国产摄像镜头系列.....	(150)
附录二 有关图片说明.....	(152)
参考资料	

第一章 固体摄像器件

固体摄像器件目前已商品化,主要类型有:电荷耦合型(CCD)、电荷注入型(CID)、金属-氧化物-半导体型(MOS)、电荷引动型(CPD)和叠层型(PLOSS)。其中以 CCD 型应用最为普遍,所以本书将重点介绍这类摄像器件的结构、原理和特性,并简略比较各种摄像器件的优缺点。电荷耦合型摄像器件(CCD)又可分为两大类:线阵 CCD 器件和面阵 CCD 器件,其工作原理基本相同,但结构各有特点,这两类器件将在后二节分别予以介绍。

第一节 CCD 基本概念和特点

60 年代末期,美国贝尔实验室 W. S. 波涅尔、G. E. 史密斯等人在研究磁泡时,发现了电荷通过半导体势阱发生转移的现象,提出了电荷耦合这一新概念和一维 CCD 器件模型。同时预言了 CCD 器件在信号处理、信号储存及图像传感中的应用前景。鉴于美国 MOS 器件工艺及硅材料研究的雄厚基础,这种新型器件的设想很快得到了实现,至 1974 年,美国 RCA 公司的 (512×320) 象元面阵 CCD 摄像机首先问世。随着大规模集成电路工艺的不断完善和推广,其它一些国家也相继赶上,纷纷研制成功了 CCD 器件。目前,尽管美国在 CCD 技术方面仍处于世界领先地位,但在中低档器件及整机方面,日本已雄霸世界市场,线阵 CCD 象元数在不断增加,性能也有明显提高。根据不同用途的需要,目前已经研制出多种类型和规格的线阵 CCD 传感器,并正向高灵敏度、高密度、高速度和宽光谱响应方向发展。例如,美国仙童公司推出的 6000 位 CCD,除了具有高速度、高灵敏度和宽动态范围等特点之外,其光谱响应范围很宽,包括了从紫外光、可见光至近红外光波段。同时,多片 CCD 拼接技术业已十分成熟,所以,该类器件除了用于空间探测和光谱测量外,还用于蓝色打印件扫描仪、缩微胶片读出器和光学字符阅读器以及各种非接触尺寸测量、定位系统中。在这些应用中,有些要求 CCD 对蓝光波段有较高的响应度,有些则要求工作频率很高。仙童公司的 6000 位 CCD,其饱和输出电压可达 3.5 伏,即使在很低的光照条件下,也有很好的光电响应度和很大的动态范围。又如美国希洛克(Xerox)公司的 5732 位 CCD,采用了两排光敏元结构和四排 CCD 读出方式,其工作频率可达 32MHz,主要用于高速传真及复印系统中。又如日本东芝公司的 5000 位 CCD,由于在工艺中采用了埋层沟道和加速电极结构,其工作频率可达 20MHz,象元及相邻象元中心间距已减小到 7 μ m,实现了高分辨率和高速读出,其光谱响应峰值已经移至紫光波段,应用十分广泛。在面阵 CCD 器件方面,美国特克特朗尼克斯(Tektronix)公司于 1985 年就推出了 2048×2048 象元的面阵 CCD 图像传感器,而今 4096×4096 象元的器件也已问世。日本方面发展也很迅速,86 年日本电气公司采用硅局部氧化技术,成功地制出了 1280×970 象元的 FTCCD,整机分辨率已达 960TVL。索尼、松下、夏普、日立等公司则大批量生产实用型的高、中、低档器件、整机,并占领了世界绝大多数市场。至今,日本不仅在数量上,而且在质量上,特别是在广播领域,已经取得了世界霸主的地位。总之,CCD 的发展是异常迅速,应用范围越来越广。CCD 图像传感器的出现和迅速发展是成像技术领域中的一个的重大突破,它集成像技术与微电子加工技术于一体。随着微电子技术的发展,CCD 技术还会继续不断地向前发展,在国民经济各领域以及军事、公安等部门展现了十分广阔的应用前景。

CCD 器件虽然也属于一种集成电路,但它不同于普通的 MOS、TTL 等集成电路,它具有多

种独特功能。通过 CCD 可以实现光电转换、信号储存、转移(传输)、输出、处理以及电子快门等一系列功能。归纳起来 CCD 器件具有以下一些特点:

1. CCD 器件是一种固体化器件,具有体积小、重量轻、电压及功耗低、可靠性高、寿命长等一系列优点。

2. 具有理想的“扫描”线性,可进行行象素寻址,可变换“扫描”速度,畸变小、尺寸重现性好,特别适用于尺寸测量、定位和成像传感等方面。

3. 有很高的空间分辨率。线阵器件现今已有 7000 象元器件、分辨能力可达 $7\mu\text{m}$,面阵器件已有 4096×4096 的器件,整机分辨能力已在 1000 电视线以上。

4. 有数字扫描能力。象元的位置可由数字代码确定,便于和计算机结合。

5. 光敏元间距的几何尺寸精确,可以获得很高的定位精度和测量精度。比如东芝的 2048 位 CCD 可达 $14\mu\text{m}$,5000 位 CCD 可达 $7\mu\text{m}$ 。

6. 具有很高的光电灵敏度和大的动态范围。目前好的器件,灵敏度可达 0.01Lx ,动态范围 $10^6:1$,信噪比 60-70dB,因此,该类器件在特定的条件下与微光像增强器输出端耦合,甚至可以检测到一个光电子。

7. CCD 数据率可调。因此可适用于动态、静态等各种条件下的测量。而且还可利用电子快门面阵 CCD 系统实现高速瞬态的记录。

8. 可任选模拟、数字等不同输出形式,可与同步信号、I/O 接口及微机兼容、组成高性能系统,适应于不同条件下使用。

总之,CCD 作为一种高性能光电图像传感器,正在不断地深入到工业、国防、人民生活等各个领域,学习和掌握一些有关 CCD 的基本结构、工作原理和使用方法乃是十分必要的。

第二节 CCD 器件的基本结构和工作原理

CCD 是一种光电转换器件,用集成电路工艺制成。它以电荷包的形式储存和传送信息,主要由光敏单元,输入结构和输出结构等部份组成。CCD 有面阵和线阵之分,光敏元排列为一行的称为线阵 CCD,象元数从 128 位至 5000 位以至 7000 位构成一个产品系列,由于生产厂家的不同,市场上有数十种型号的器件可供选用。面阵 CCD 器件象元排列为一平面,它包含若干行和列的结合。目前达到实用阶段的象元数由 25 万至数百万个不等(绝大多数在 30 万~50 万间),按照片子的尺寸不同有 8mm 芯片,1/3 英寸、1/2 英寸、2/3 英寸以至 1 英寸之分。按使用场合的不同有彩色和黑白 CCD 芯片之别,目前,绝大部分面阵 CCD 是以整机的形式投放市场。无论线阵 CCD,还是面阵 CCD,工作原理基本相同,下面将予以介绍。

一、光电转换、储存

CCD 器件是由许多个光敏象元组成的,每个象元就是一个 MOS 电容器(现今大多为光敏二极管),参见图 1-1。它是在 P 型 Si 衬底的表面上用氧化的办法生成一层厚度约 $1000\text{\AA} \sim 1500\text{\AA}$ 的 SiO_2 ,再在 SiO_2 表面蒸镀一金属层(多晶硅),在衬底和金属电极间加上一个偏置电压,于是就构成了一个 MOS 电容器。当一束光线投射到 MOS 电容上时,光子穿过透明电极及氧化层,进入 P 型 Si 衬底,衬底中处于价带的电子将吸收光子的能量而跃入导带,如图 1-2 所示,价电子能否跃迁至导带形成电子-空穴对,将由入射光子能量 $h\nu$ 是否大于等于 E_g 来确定,亦即

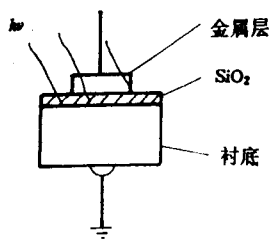


图 1-1 MOS 二极管

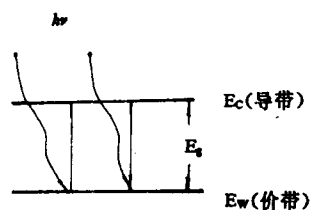


图 1-2 电子能带跃迁图

$$E_g = 1.24 / \lambda_c \quad (1-1)$$

这里 E_g 表示了半导体禁带宽度。

对于 Si 材料来说, $E_g = 1.12\text{eV}$ 代入(1-1)式可得

$$\lambda_c = 1.1\mu\text{m}。$$

也就是说,波长小于和等于 $1.1\mu\text{m}$ 的光子能使硅衬底中的价带电子跃入导带,产生电子-空穴对;而大于 $1.1\mu\text{m}$ 波长的光子则会穿透半导体层而不起作用。波长太短的光子由于穿透能力弱还进入不了衬底,因而也就不产生电子-空穴对。对于不同的衬底材料,将具有不同的 E_g 值,因而对应了不同的 λ_c , 表 1-1 中列示一些半导体材料的 E_g 和 λ_c 值。

表 1-1 几种半导体材料在所示温度下的 E_g 、 λ_c 值

半导体	T(K)	$E_g(\text{eV})$	$\lambda_c(\mu\text{m})$
CdS	295	2.4	0.52
CdSe	295	1.8	0.69
CdTe	295	1.5	0.83
GaP	295	2.24	0.56
GaAs	295	1.35	0.92
Si	295	1.12	1.1
Ge	295	0.67	1.8
PbS	295	0.42	2.9
PbSe	195	0.23	5.4
InAs	195	0.39	3.2
InSb	77	0.23	5.4
$\text{Pb}_{0.2}\text{Sn}_{0.8}\text{Te}$	77	0.1	12
$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$	77	0.1	12

不难看出,选用不同的衬底材料,器件将具有不同的光谱特性,从而可适用于不同的场合。

光子进入衬底时产生的电子跃迁,形成电子-空穴对,电子-空穴对在外加电场的作用下,分别向电极两端移动,这就是光生电荷。这些光生电荷将储存在由电极形成的“势阱”中。光生电荷的产生决定于入射光子的能量(即投射光波长)、及光子的数量(入射光强度)。由于光子入射时,经历了多层膜的吸收、反射和干涉,光谱曲线呈现出多个谷、峰,使得量子效率降低,灵敏度也就降低了。再者由于多晶硅电极对光谱中短波部分吸收厉害,造成蓝光响应差,短波长灵敏度更低。鉴于上述有关原因,目前的 CCD 器件均采用光敏二极管代替了过去的 MOS 电容器,光敏二极管结构示意图如图 1-3 所示。

光电二极管,是在 P^- 型 Si 衬底上扩散一个 N^+ 区域以形成 P-N 结二极管。通过多晶硅

相对二极管反向偏置,于是在二极管中产生一个定向电荷区(称之为耗尽区)。在定向电荷区中,光生电子与空穴分离,光生电子被收集在空间电荷区中。空间电荷区对带负电的电子而言,是一个势能特别低的区域,因此通常又称之为势阱。投射光产生的光生电荷就储存在这个势阱之中,势阱能够储存的最大电荷量又称之为势阱容量,势阱容量与所加栅压近似成正比。光敏二极管和 MOS 电容器相比,光敏二极管具有灵敏度高,光谱响应宽,蓝光响应好,暗电流小等特点。如果将一系列的 MOS 电容器或光敏二极管排列起来,并以两相、三相或四相工作方式把相应的电极并联在一起,并在每组电极上加上一定时序的驱动脉冲,这样就具备了 CCD 的基本功能。

二、电荷转移

在讨论电荷转移之前,我们以 MOS 电容器这一基本单元为例讨论一下由电位方程引出的一些结论。

对于任一个 MOS 电容来说,它可以用下面的方程来加以描述。

$$V_s = V_G - V_{FB} - \frac{1}{C_i} \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_s q N_A (V_G - V_{FB})} \quad (1-2)$$

其中: V_s —— S_i 表面电势

V_G ——外加偏置电压

V_{FB} ——修正电压

$C_i = \frac{\epsilon_0\epsilon_s}{d_i}$ 为单位面积氧化层电容

ϵ_0 ——真空介电常数

ϵ_s ——Si 介电常数

N_A ——掺杂浓度

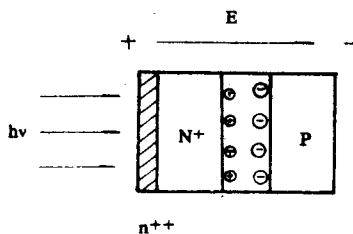


图 1-3 光电二极管

不难看出,深耗尽状态时,表面势 V_s 特别大,表面处电子的静电势能 $-qV_s$ 特别低,形成

了电子的深势阱,其深度为 qV_s , 那些代表信息的电子电荷就储存在这一势阱中。还需指出的是,后面二项在通常情况下数值很小,因此有 $V_s \approx V_G$, 也就是说 V_s 与 V_G 基本上是呈线性关系的,偏置电压越高,势阱越深。

MOS 电容器的电荷储存量可由下式求得

$$Q_s = C_i \cdot V_G \cdot A \quad (1-3)$$

式中 A 为 MOS 电容栅电极尺寸。由此可见,光敏元面积越大,其光电灵敏度越高。对于 $A = 10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 的电容器而言, Q_s 近似为 10^6 个电子。当光生电荷超过 MOS 电容的储存容量时,势阱将发生溢出,于是就出现常说的过荷开花现象。图 1-4 示出了一个三相驱动工作的 CCD 中电荷转移的过程。

假设电荷最初存储在电极(1)(加有 10V 电压)下面的势阱中,如图 1-4(a)所示,加在 CCD 所有电极上的电压,通常都要保持在高于某一临界值电压 V_m , V_m 称为 CCD 阈值电压,设 $V_m = 2V$ 。所以每个电极下面都有一定深度的势阱。显然,电极(1)下面的势阱最深,如果逐渐将电极(2)的电压由 2V 增加到 10V,这时(1)、(2)两个电极下面的势阱具有同样的深度,并合并在一起,原先存储在电极(1)下面的电荷,就要在两个电极下面均匀分布,如图 1-4(b)、(c)所示,然后,再逐渐将电极(1)的电压降到 2V,使其势阱深度降低,如图 1-4(d)、(e)所示,这时电荷全部转移到电极(2)下面的势阱中,此过程就是电荷从电极(1)到电极(2)的转移过程。如果电极

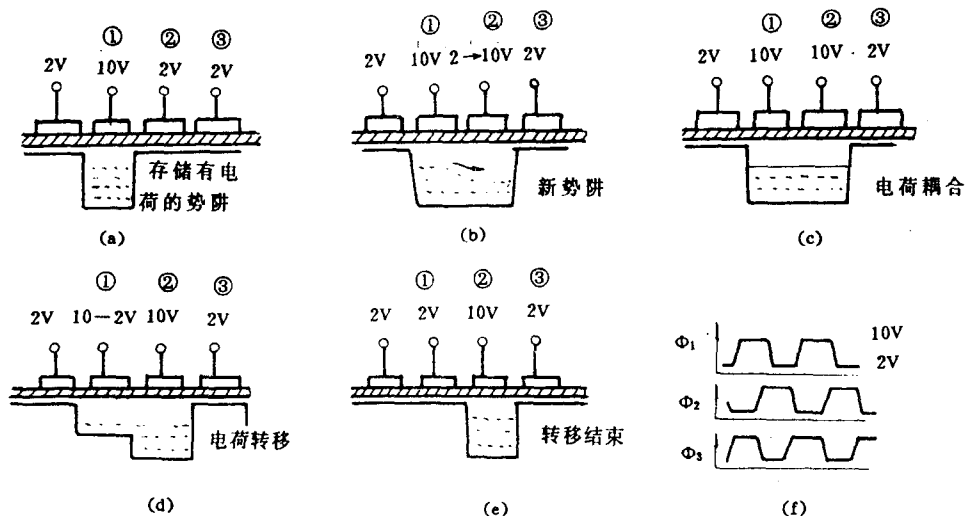


图 1-4 三相 CCD 中电荷转移过程

有许多个,可将其电极按照 1、4、7……,2、5、8……和 3、6、9……的顺序分别连接在一起,加上一定时序的驱动脉冲,如图 1-4(f)所示,即可完成电荷从左向右转移的过程,用三相时钟驱动的 CCD 称为三相 CCD。

这里需要提及转移效率的问题,CCD 象元多,所需转移的次数也很多,比如对于一个单相的 1024 位象元的 CCD 器件来说,第一个象元的光电信号需要经过 1070 次转移才能使信号输出。由于界面态及 Si 表面缺陷等因素的影响,电荷包在进行每一次转移时都会残留一些电荷,所以转移效率总是小于 1 的。当前实用器件的总的转移效率一般可达 95%,所以每次转移效率有的竟高达 0.99999 以上。要获得如此高的转移效率除了克服 Si 表面缺陷之外,在结构上还采用了体内沟道 CCD 技术,由于体内沟道的引入使转移效率较原来提高了一个数量级,同时还提高了器件的工作频率,降低了器件的噪声。

但体内沟道也带来了容量降低的问题。为此一些新的结构如 P-CCD、PP-CCD 器件又相继问世,鉴于篇幅的限制这里就不一一介绍了。

三、电荷读出

通常 CCD 信号电荷的读出是采用选通电荷积分器结构,以三相 CCD 为例,其电荷读出原理如图 1-5 所示。

信号电荷包在外加驱动脉冲的作用下,在 CCD 移位寄存器中按顺序传送到输出级。当电荷包进入最后一个势阱(Φ_3 下面)中时,复位脉冲 Φ_R 为正,场效应管 T_1 导通,输出二极管 D 处于很强的反向偏置之下,其结电容 C_s 被充电到一个固定的直流电平 V_{cc} 上,于是源极跟随器 T_2 的输出电平 V_o 被复位到一个固定的且略低于 V_{cc} 的正电平上,此电平称为复位电平。当 Φ_R 正脉冲结束后, T_1 截止,由于 T_1 存在一定的漏电流,这漏电流在 T_1 上产生一个小的管压降,使输出电压有一个下跳,其下跳值称为馈通电压。当 Φ_R 为正时, Φ_3 也处于高电位,信号电荷被转移到 Φ_3 势阱中,由于输出栅压 V_{∞} 是一个比 Φ_3 低的正电压,因此信号电荷仍被保存在 Φ_3 势阱中,但随着 Φ_R 正脉冲结束,并变得低于 V_{∞} 电平时,这时信号电荷进入 C_s 后,即使 A 点电位下降到一个与信号电荷量成正比的电位上,即信号电荷越多, A 点电位下降越多。

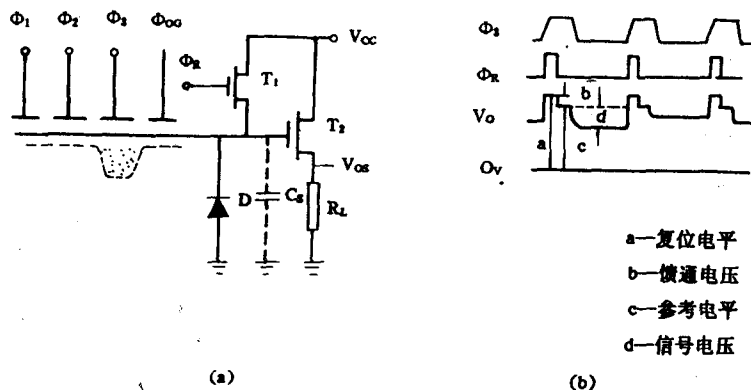


图 1-5 CCD 输出电路结构与输出信号波形图

与此相应, T_2 输出电平 V_o 也跟随下降, 其下降幅度才是真正的信号电压, CCD 输出信号波形如图 1-5(b) 所示。

以上分析说明, CCD 输出信号具有以下几个特点:

1. 每个象元输出的信号浮置在一个正的直流电平(约 7-8V)上, 信号电平在几十至几百 mV 范围内变化, 呈单极性负向变化。
2. 输出信号随时间轴, 按离散形式出现, 每个电荷包对应着一个象元, 中间由复位电平隔离, 要准确检测出象元信号, 必须清除复位脉冲干扰。
3. 输出信号 ΔV_s 与电荷量 ΔQ_s 成正比, 与输出电容 C_s 成反比, 即

$$\Delta V_s = \frac{\Delta Q_s}{C_s}$$

放大器输出电压:

$$V_{os} = G \Delta V_s = \frac{GF}{C_L} \times \Delta Q_s \quad (1-4)$$

其中 G 为输出放大器增益。

4. 禁止 CCD 输出端对地短路。

综上所述, CCD 图像传感器既具有光电转换功能, 又具有信号电荷的存储、转移和读出功能, 它能在一幅空间域分布的光学图像, 变换成一系列按时间域分布的离散信号电压。

第三节 CCD 器件的性能参数

摄像器件的性能参数包括灵敏度、分辨率、信噪比、光谱响应、动态范围、暗电流和图像滞后等, CCD 摄像器件的优劣可用上述参数来衡量。由于 CCD 器件结构、工作方式的差异, 对这些参数的影响有所不同, 故下面除介绍 CCD 器件的有关性能之外, 还要将就其影响参数的诸因素及其改善途径, 以及 CCD 器件存在的几个固有问题, 如莫尔效应、光晕效应、缺陷和拖影等问题, 作一些讨论。

一、光电转换特性与响应度

CCD 图像传感器的光电转换特性即输入/输出特性如图 1-6 所示。

由于 CCD 图像传感器是用硅材料制成的, 所以它的光电转换特性与硅靶摄像管相似, 对于恒定的曝光量, 在一定范围内将产生恒定的信号输出。若以 X 轴表示曝光量, 以 Y 轴表示输出信号幅度, 那么特性曲线的线性段可用下式表示:

$$y = ax' + b \quad (1-5)$$

式中 y 为输出信号电压(V), X 为曝光量(lx · s), a 为直线段的斜率, 它表示 CCD 的光响应度(V/lx · s), γ 为光电转换系数(γ ≈ 1)、b 为无光照时 CCD 输出电压, 称为暗输出电压 V_{DARK}(V)。当曝光量一定时, a 的大小直接影响着 CCD 的输出幅度。一只良好的 CCD 传感器, 应具有高的光响应度和低的暗输出电压。

特性曲线的拐点 G 所对应的曝光量叫饱和曝光量(S_E), 高于这点的曝光量, CCD 输出信号不再增加, G 点所对应的输出电压叫饱和输出电压(V_{SAT})。

由 1-5 式可知, CCD 的响应度(R)可定义为单位曝光量所得到的有效信号电压(V/lx · s), 也就是说, 在一定的像面照度下, R 的大小等于有效信号电压(V)与其曝光量(lx · s)之比值。R 的大小反映了 CCD 象元的灵敏度(S)和输出级的电荷/电压转换能力(k)。

CCD 象元灵敏度或称量子效率表示出在一定的曝光量下, 象元势阱中所收集的光生电荷数与入射到象元表面上的光子数之比值, 它与象元的有效孔径、象元结构和衬底结构有关。象元孔径等于象元的光敏区面积与象元总面积之比。在两种象元结构中, MOS 象元在蓝光波段的灵敏度约等于光电二极管象元的 1/5。衬底结构主要是指衬底中光学有效层的厚度。

CCD 象元的光生电荷转换成信号电压是在输出二极管中完成的, 当象元的光生电荷量为 ΔQ_s, 输出二极管的电容为 C_s 时, 在二极管上得到的输出信号电压 ΔV_s = ΔQ_s/C_s, 假设输出放大器的增益为 G, 则 CCD 输出的视频信号电压为:

$$V_{os} = G \Delta V_s = G \cdot k \frac{\Delta Q_s}{C_s}$$

若把 V_{os} 与 ΔQ_s 之比定义为输出转换因子 k, 则可用下式算出 k 的大小。

$$k = \frac{V_{os}}{\Delta Q_s} = \frac{G}{C_s} \quad (1-6)$$

通常 k 值是以电子电荷为参考量, 单位为 μV/e⁻, 这时 k 可用下式表示:

$$k = q \frac{G}{C_s} \quad (1-7)$$

式中: q——一个电子的电荷量

当以 MOS 源极跟随器作输出放大器时, 其电压增益 G 约为 0.7, 输出二极管电容 C_s 的典型值为 0.08pf, 由 (1-7) 式可以算得 k = 1.4 μV/e⁻。

图 1-7 表示出了三种硅摄像器件的光谱响应的比较。其中曲线(1)是背照的硅靶摄像管, 在整个可见光和近红外光谱部分的灵敏度已经达到理论极限。曲线(2)是前照行间转移 CCD 摄像器的光谱特性, 虽然采用光电二极管作象元, 但象元结构复杂, 开口率低, 其结果平均量子效率只有 20%, 左右, 而且在近红外光谱区也一样, 这种器件若用于彩色摄像, 必须加红外滤色片。曲线(3)是前照 X-Y 寻址 MOS 型固体摄像器件的光谱特性。由图可知, 它比前一种器件的灵敏度更高些, 而且短波响应增强了, 近红外响应被抑制, 这表明该器件除开口率大外, 还采

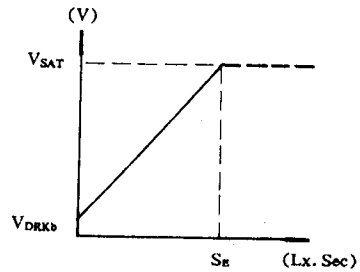


图 1-6 CCD 光电转换特性