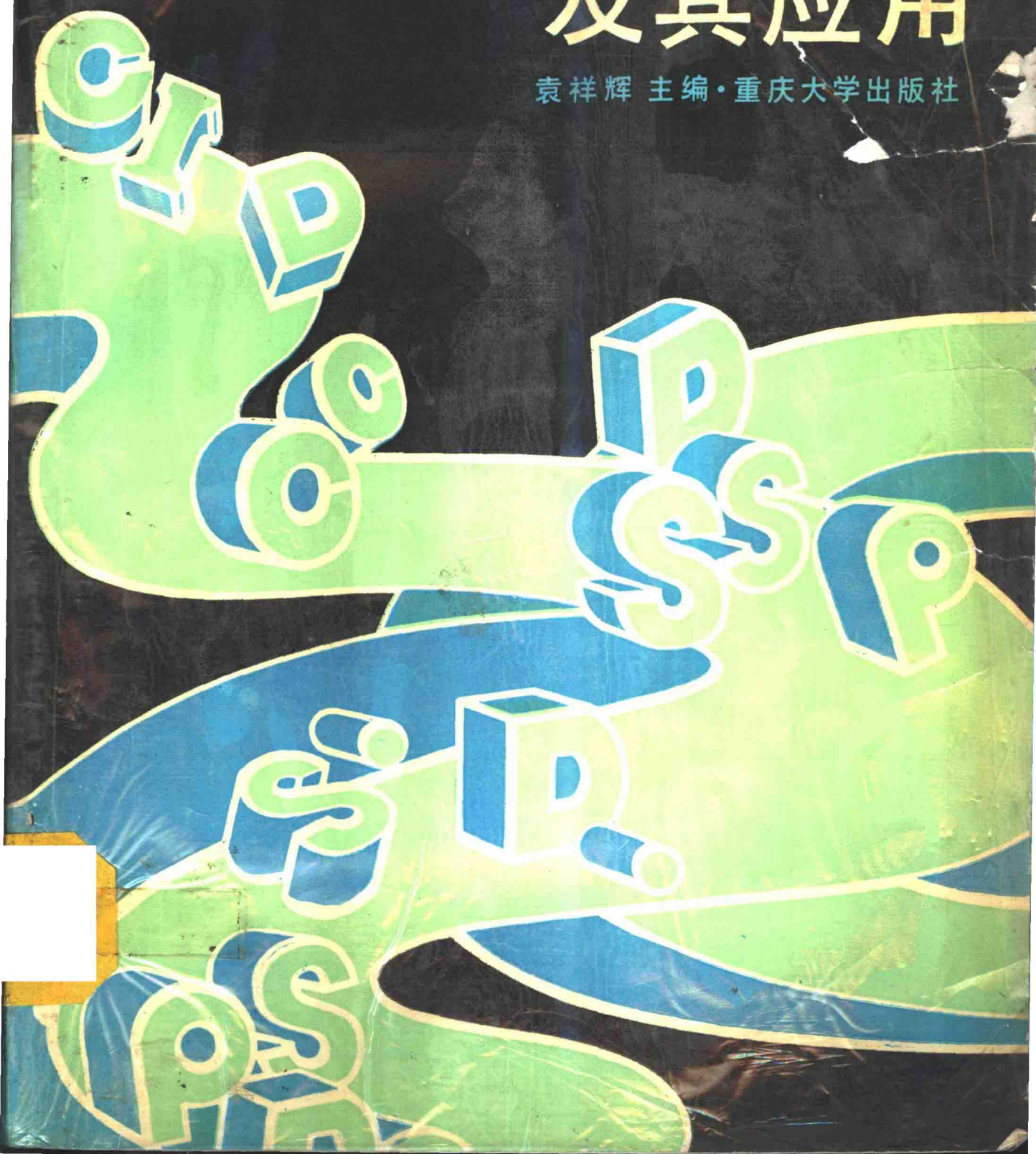


● Gutituxiang Chuanganqi jiqi Yingyong

固体图象传感器 及其应用

袁祥辉 主编·重庆大学出版社



固体图象传感器及其应用

袁祥辉 主编

第1版

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是介绍SSPD图象传感器的专著。书中详细地讲述了常用固体图象传感器的工作原理、主要特性、外围电路、与微型计算机的接口技术及其用途和使用方法。在附录中，还介绍了国内外部分公司、研究所的最新典型产品。

该书内容新颖丰富，涉及知识面广，很有实用价值；适合于大专院校有关光电检测技术专业的教师、研究生、高年级本科生，及从事光电技术研究的工程技术人员。

固体图象传感器及其应用

袁祥辉 主编

责任编辑 韩 洁

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：8.75字数：218千

1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷

印数：1—1900

标准书号：ISBN 7-5624-0420-8 定价：2.74元
TM·26

前 言

工业发达国家对传感器技术十分重视,并已将其广泛应用于工农业生产、国防、科研各个部门。由于人类获取信息的多数来自视觉器官,所以,图象传感器在各种传感器中占有极为重要的地位。而固体图象传感器还能拓宽人类视觉功能,它的出现,引起了光电检测技术的变革。近年来,固体图象传感器在国民生产各个领域,国防、科研各方面得到越来越广泛的应用。因此,对固体图象传感器本身的了解、认识,显得十分重要。

本书是作者在1988年为研究生课程编写的《固体图象传感器》讲义基础上,修改、补充而成的,目的是为了满足不同大专院校“精密仪器”、“光学仪器”、“检测技术与仪器”、“光电技术”等专业的教师、研究生、本科生,以及从事光电技术的科研及工程技术人员的需要。作者主要从应用角度出发,比较系统地介绍了常用的固体图象传感器,特别是SSPD图象传感器的工作原理、特性参数,设计考虑及应用知识。书中的应用举例,多数取材于作者的科研实践,有实用价值。本书还汇集了国内外各种典型商品器件的最新特性参数。

全书共有七章和一个附录,内容可分为三部分。第一部分是常用的几种固体图象传感器的工作原理及特性参数,包括第一章自扫描光电二极管阵列(SSPD器件),第二章电荷耦合图象传感器(CCD器件以及CCPD和CID器件),第三章固体图象传感器的主要特性参数及测量。第二部分为图象传感器的应用电路及与计算机的接口技术,包括第四章驱动电路及信号读出与处理,第五章图象传感器与微机的接口技术。第三部分是设计探讨及应用举例,包括第六章固体图象传感系统的设计探讨,第七章固体图象传感器的应用。全书重点介绍SSPD器件的原理及应用,这在国内尚属首次。

本书由袁祥辉主编,其中,吕果林编写了第二章及附录,并参加了绪论和第六章的编写;袁祥辉执笔编写了其余各章,并统编了全稿。

本书在编写过程中,得到不少同志的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,时间仓促,书中的错误和不妥之处,在所难免敬请读者批评指正。

作者

1991年2月28日

目 录

绪 论

第一章 自扫描光电二极管阵列

§ 1-1 SSPD线列阵	(4)
§ 1-1-1 简单的线列阵	(4)
§ 1-1-2 普通移位寄存器的电路	(4)
§ 1-1-3 一种低功耗动态移位寄存器	(5)
§ 1-1-4 电荷存贮方式工作原理	(7)
§ 1-1-5 开关噪声及补偿方法	(11)
§ 1-1-6 多相时钟线列阵	(12)
§ 1-2 SSPD面列阵	(15)
§ 1-2-1 再充电采样型面列阵	(15)
§ 1-2-2 电压采样型面阵	(16)
§ 1-3 特殊列阵	(18)
§ 1-3-1 环形列阵	(18)
§ 1-3-2 粗线纹光栅位移传感用光学扫描器	(18)
§ 1-3-3 X射线探测用列阵	(19)

第二章 电荷耦合图象传感器

§ 2-1 CCD的MOS结构及存贮电荷原理	(21)
§ 2-2 电荷转移工作原理与电极结构	(24)
§ 2-2-1 定向转移	(24)
§ 2-2-2 电极结构	(25)
§ 2-3 埋沟CCD的结构及工作原理	(27)
§ 2-4 电荷注入和读出	(28)
§ 2-4-1 电荷注入方法	(28)
§ 2-4-2 电荷读出方法	(29)
§ 2-5 CCD图象传感器	(30)
§ 2-5-1 CCD线列阵	(30)
§ 2-5-2 CCD面列阵	(31)
§ 2-6 电荷耦合光电二极管阵列CCPD	(32)
§ 2-6-1 SSPD和CCD两种图象传感器的性能比较	(32)

§ 2-6-2	CCPD列阵	(33)
§ 2-7	电荷注入器件CID	(34)

第三章 固体图象传感器的主要特性参数及测量

§ 3-1	光谱响应特性	(37)
§ 3-2	光电转换特性	(38)
§ 3-3	灵敏度 S	(39)
§ 3-4	灵敏度的不均匀性	(40)
§ 3-5	暗信号及动态范围	(41)
§ 3-5-1	暗信号	(41)
§ 3-5-2	动态范围	(41)
§ 3-5-3	不均匀性及动态范围的测试	(42)
§ 3-6	分辨率	(43)
§ 3-6-1	调制传递函数MTF	(43)
§ 3-6-2	MTF的实验测试方法	(46)
§ 3-7	窗口响应特性	(47)
§ 3-8	工作频率	(48)
§ 3-9	CCD的特性参数	(48)
§ 3-9-1	转移效率 η	(48)
§ 3-9-2	工作频率	(49)
§ 3-9-3	暗电流特性	(50)

第四章 驱动电路及信号读出与处理

§ 4-1	固体图象传感器的典型驱动电路	(51)
§ 4-1-1	CL型两相SSPD线列阵的驱动电路	(51)
§ 4-1-2	CL型四相器件驱动电路	(53)
§ 4-1-3	日本OPA128线阵驱动电路	(54)
§ 4-1-4	两相CCPD器件驱动电路	(55)
§ 4-2	信号读出及放大电路	(56)
§ 4-2-1	SSPD图象传感器的信号读出	(56)
§ 4-2-2	CCPD (CCD) 的读出放大器	(62)
§ 4-3	视频信号的处理——不均匀性补偿的必要性和方法	(62)
§ 4-3-1	一种补偿技术	(64)
§ 4-3-2	补偿网络的设计考虑	(65)
§ 4-3-3	不均匀性补偿电路	(65)
§ 4-3-4	实验测量情况	(66)

第五章 图象传感器与微机接口技术

§ 5-1	二值化数字信号接口	(68)
§ 5-1-1	简单计数型接口	(68)

§ 5-1-2 按位二值化数字接口	(69)
§ 5-1-3 二值化电路中使用的“自动阈值电路”	(73)
§ 5-2 逐位A/D转换接口	(74)

第六章 固体图象传感系统的设计探讨

§ 6-1 简单的摄象检测系统	(79)
§ 6-2 实用照明技术和装置	(80)
§ 6-2-1 材料的光学反射、吸收和透射特性	(80)
§ 6-2-2 光源的光谱特性	(80)
§ 6-2-3 照明装置的基本类型	(81)
§ 6-2-4 照明技术	(82)
§ 6-2-5 设计考虑	(85)
§ 6-2-6 应用举例	(87)
§ 6-3 镜头类型及常用术语	(88)
§ 6-3-1 镜头类型	(88)
§ 6-3-2 选择镜头和图象传感器常用的术语	(89)
§ 6-3-3 镜头和图象传感器的选择	(90)
§ 6-4 系统性能评价	(92)
§ 6-4-1 光学子系统	(92)
§ 6-4-2 固体图象传感器	(93)
§ 6-4-3 视频信号处理	(95)
§ 6-4-4 系统的评价	(96)

第七章 固体图象传感器的应用

§ 7-1 图象传感器的用途	(98)
§ 7-2 应用举例	(98)
§ 7-2-1 热轧钢管外径测量	(98)
§ 7-2-2 胶帘布厚度在线检测	(100)
§ 7-2-3 透明薄膜厚度快速测试仪	(104)
§ 7-2-4 激光衍射测微应用	(108)
§ 7-2-5 环形列阵在机器视觉检测中的应用	(110)
§ 7-2-6 粗线纹光栅精密位移测量系统	(113)

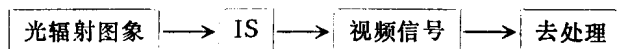
附录 国内外典型产品介绍	(115)
参 考 资 料	(129)

绪 论

一、发展概述

现代人类生活中，人们迫切需要获取信息，而人类获取的总信息量的80%以上，是通过视觉器官得到的。所以，图象传感器（Imaging Sensor——缩写为IS，又称成像器件、摄像器件），作为现代视觉信息获取的一种基础器件，因其能实现信息的获取、转换和视觉功能的扩展（光谱拓宽，灵敏度范围扩大），能给出直观、真实、层次最多、内容最丰富的可视图象信息，而在现代社会中得到了越来越广泛的应用。

图象传感器的功能是把光学图象转换为电信号，即把入射到传感器光敏面上按空间分布的光强信息（可见光和不可见光），转换为按时序串行输出的电信号——视频信号，而视频信号能再现入射的光辐射图象。把空间图象转换为按时序变化的电信号的过程称为扫描。



60年代前，摄像的任务主要都是用各种电子束摄像管（如光导摄像管，飞点扫描管等）来完成。60年代后期，随着半导体集成电路技术，特别是MOS集成电路工艺的成熟，各种固体图象传感器得到迅速发展。到70年代末期，已有一系列产品，在军事、民用各方面得到广泛应用。

固体图象传感器（Solid State Imaging Sensor——缩写为SSIS）主要有三大类型：一种是电荷耦合器件（Charge Coupled Device，简称CCD），第二种是MOS图象传感器，又称自扫描光电二极管阵列（Self Scanned Photodiode Array，简称SSPD），第三种是电荷注入器件

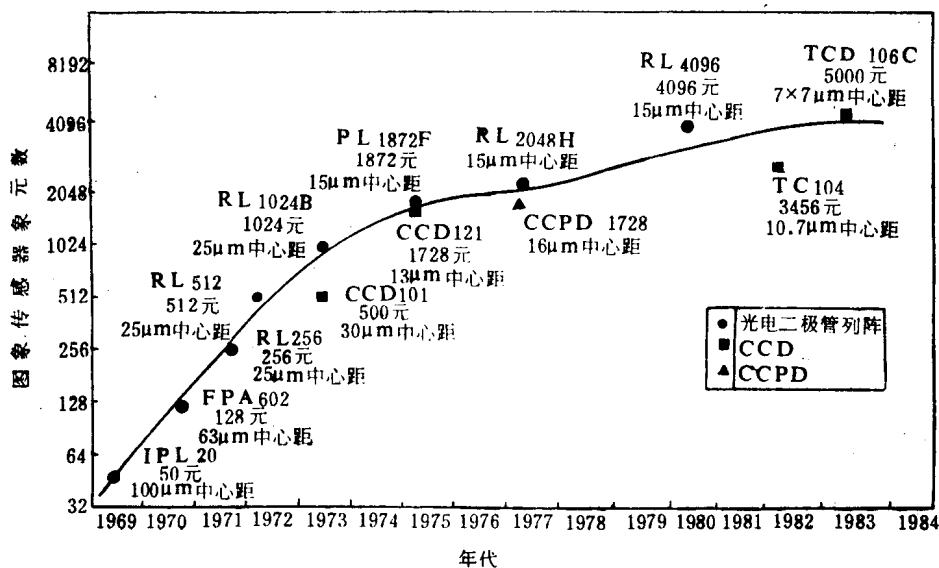


图0-1 SSIS发展史曲线

(Charge Injection Device, 简称CID)。目前, 前两种用得比较多。

目前国外生产自扫描光电二极管阵列的厂家, 以美国Reticon公司水平比较高。线阵列有64~4096位系列产品, 扫描频率达10MHz(单线); 面阵列有14×41~1200×400位产品, 以及64~720位环形阵列等, 共约50余个品种。日本对MOS图象传感器比较重视, 日立公司要求在家用方面实用化, 该公司已有384×484位面阵, 用于彩色摄象机内。

CCD图象传感器主要作为一些军事及民用高技术产品。在军事上的应用, 各国尤为关注, 因此发展更快, 水平更高。目前线阵有5732位产品(Xerox公司), Eastman Kodak公司已能提供2048×2048的CCD面阵, 其象元尺寸 $9\mu\times 9\mu$, 且抗光晕。此外, 美国有公司将5个2048位CCD管芯拼成了10240位长线阵CCD。

由于固体图象传感器能探测可见光、紫外光、X射线、红外光、微光及电子轰击等, 因此它在科研、生产和军事上应用面很广。特别是用化合物半导体(如InSb、HgCdTe)制成的红外CCD, CID, 近年来得到了极大发展。HgCdTe线阵已达1024位, 而单片式红外CCD面阵, 日本三菱公司已作出512×512的PtSi、IrSi CCD面阵IrSi的截止波长为 $7.4\mu\text{m}$ 。

世界上固体图象传感器的产量也很高, 据报道, 日本东芝公司就月产12~15万个(包括线阵), 日本的售价低于美国。

国内研制CCD图象传感器的单位比较多, 以机电部44所和13所水平较高。1984年13所已研制出2500象元的CCD线阵, 44所已有580×392的面阵产品。

自扫描光电二极管阵列目前国内仅重庆大学在研制。由于设备条件限制, 现在只有256位以内的线阵产品和160象元的CG160型专用线阵(精密位移传感用的扫描器)。预计在不久的将来, 将研制出512~2048位系列线阵产品, 性能可达到国外80年代初的产品水平。和国外比, 我国差距还较大。

电荷注入器件, 目前国内正在加紧研制, 已有单位作出了InSb的64元线阵和32×32元面阵。

二、优点

同电子束摄象管相比, 固体图象传感器有以下显著优点:

- (1) 全固体化, 体积很小, 重量轻, 工作电压和功耗都很低; 耐冲击性好, 可靠性高, 寿命长。
- (2) 基本上不保留残象(电子束摄象管有15~20%的残象), 无象元烧伤、扭曲, 不受电磁干扰。
- (3) 红外敏感性。SSPD光谱响应: $0.25\sim 1.1\mu\text{m}$; CCD可作成红外敏感型; CID主要用于光谱响应大于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的红外敏感器件。
- (4) 象元尺寸的几何位置精度高(优于 $1\mu\text{m}$), 因而可用于不接触精密尺寸测量系统。
- (5) 视频信号与微机接口容易。

三、应用领域简介

1. 小型化黑白、彩色TV摄象机

这是面阵应用最广的领域。固体摄象机体积很小, 携带方便, 如日本松下的CDT型超小型CCD彩色摄象机, 直径17mm, 长48mm, 使用超小型镜头, 重量只有54g, 深受欢迎。国外许多公司都在加紧开发, 主要是提高性能价格比。典型的TV用IS尺寸: $7\times 9\text{mm}^2$, 480

×380象元。可用它构成TV摄像、录像显示系统。最近日本索尼、东芝公司研制出的帧一行间转移CCD彩色广播摄像机，其图象质量已达到广播电视水平。国外正在向家用化方向普及。

2. 传真通讯系统

传真是现代通讯系统必不可少的手段，用1024~2048象元的线阵作的传真机，可在几秒钟内看到从世界一个地区传到另一地区的图象。用东芝TCD160C线阵CCD，象元为500，工作频率20MHz，在不到一秒钟的时间内可完成A4开稿件的扫描。

3. 光学字符识别 (OCR)

人们研制SSIS最初的一种想法，是想用于光学字符识别，以IS代替人眼，把黑白字符变为相应的电信号，数字化以后送到计算机去识别。已设计出各种OCR机，可用于读出成组的支票、信用卡、手写计算机程序清单、手写邮件等等。如重庆大学1985年研制成功的CD—1型OCR机，使用该校自己研制的CL—64型SSPD器件，可识别手写的计算机程序清单，识别率达到99.9%的国内外先进水平。

4. 广播TV

现在广播TV使用的光导摄像管有严重缺点：寿命有限，象元易烧伤，有残象（拖影）等，用SSIS代替就没有上述问题。国外在加紧研制，CCD和MOS IS正在超过光导摄像管。1986年柯达公司已推出140万象点的IS，尺寸为 $7 \times 9 \text{ mm}^2$ ，比电视图象信号多4倍以上。

5. 工业检测与自动控制

这是图象传感器用量很大的一个领域，统称机器视觉应用。目前已在钢铁、木材、纺织、粮食、医药、机械等工业方面作零件尺寸的动态检测，产品质量、包装、形状识别、表面缺陷检测，等等。主要通过图象处理来实现，可大大减轻人们劳动强度，提高工作效率和产品质量。在自动控制方面，作为计算机获取被控制信息的一个重要手段，还可以作机器人的视觉传感器。

6. 医疗仪器

可用于各种标本检查分析（如血细胞分析仪），眼球运动检测，X射线摄像，胃镜、肠镜摄像等等。

7. 天文应用

天文摄像、观测、航天飞机、天文气象卫星检测等。

8. 多光谱机载和星载遥感

从空间获取地球上的图象信息具有十分重要的价值。国外已用几个线阵或面阵传感器拼接的阵列作空间遥感应（如美国用5个2048位拼接的10240位长线阵CCD，取代了卫星侦察用的125mm宽侦察胶卷），作地球资源卫星传感器，接收有关气象、火山活动情况，地质数据资料信息，送回地面。

9. 军事应用

作卫星侦察、航空遥感（如1985年欧洲空间局首次在SPOT卫星上使用大型线阵CCD扫描式扫描，地面分辨率提高到10m）、微光夜视、导弹制导，目标跟踪、军用图象通信等等。特别是工作在1~14mm波段的传感器，在军事、航天等领域的应用价值远远超过可见光传感器。

总之，固体图象传感器是传感器领域极其重要的部分，随着人们对其进一步深入认识，发现，相信今后会出现更多性能更完善的器件，还会得到更多更重要的应用。

第一章 自扫描光电二极管阵列

自扫描光电二极管阵列(以下简称SSPD器件)又叫做MOS型图象传感器,它的自扫描电路由MOS移位寄存器构成。根据象元的排列形状不同,它又分为线列阵、面列阵以及特殊列阵(如环形列阵)等。线列阵如不另加扫描机构,只能对一维的光强分布进行光电转换。但由于它的成本低,且许多被测对象本身就在运动之中,自然形成另一维扫描,故在机器视觉检测方面用量很大。面列阵可以直接对二维图象进行光电转换。

§1-1 SSPD线列阵

§1-1-1 简单的线列阵

图1-1是一种再充电采样的SSPD线列阵电路框图。它主要由3部分组成:

(1) N 个形状和大小完全相同的光电二极管,每个二极管上有相同的存贮电容 C_d ,用半导体集成电路技术在硅片上把它们等间距的排列成一条直线,故称为“线列阵”。所有二极管的负极连在一起,组成“公共端”COM。图中 N 为列阵的位数(象元数)。

(2) N 位多路开关,由MOS场效应晶体管(FET) $T_1 \sim T_N$ 组成,每个FET的源极分别与相应二极管的正极相连,而所有的漏极连在一起,组成“视频输出线” V_o 。

(3) N 位MOS动态移位寄存器,作扫描电路用。移位寄存器每位的输出 $e_1 \sim e_N$ 与对应的MOS开关的栅极相连。给移位寄存器加上两相互补的时钟脉冲 ϕ_1 和 ϕ_2 ,用一个周期性的起始脉冲 S 引导每次扫描的开始,移位寄存器就产生依次延迟一拍的采样脉冲,使多路开关 $T_1 \sim T_N$ 按顺序依次闭合、断开,从而把 $1 \sim N$ 位二极管上的光电信号从视频线上串行输出,这就是所谓的“自扫描”功能。

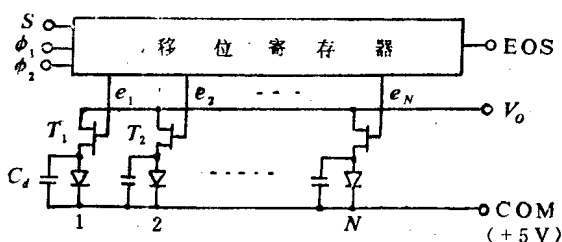


图1-1 SSPD线阵电路框图

§1-1-2 普通移位寄存器的电路

图1-2(a)是一种典型的四管单元动态移位寄存器电路。其中,两相互补时钟 ϕ_1 、 ϕ_2 是作为动态电源用, S 是扫描起始信号。这种移位寄存器主要利用MOS场效应晶体管输入阻抗很大($\geq 10^9 \sim 10^{10} \Omega$)和栅电容能存贮电荷的特点构成的。电路的工作波形如图1-2(b)所示,工作原理如下:

在 $t_0 \sim t_1$ 期间, ϕ_1 为第一位移位寄存器提供负电源(约为 $-10 \sim -15V$),起始脉冲 S 的幅度 $V_s = -7V$ 左右,大于 T_1 的开启电压 V_{th} (约为 $-1 \sim -3V$),使 T_1 导通。 T_1-T_2 和 T_3-T_4 分别

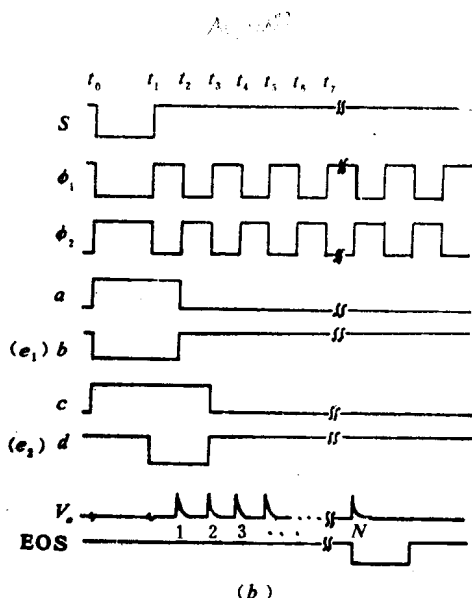
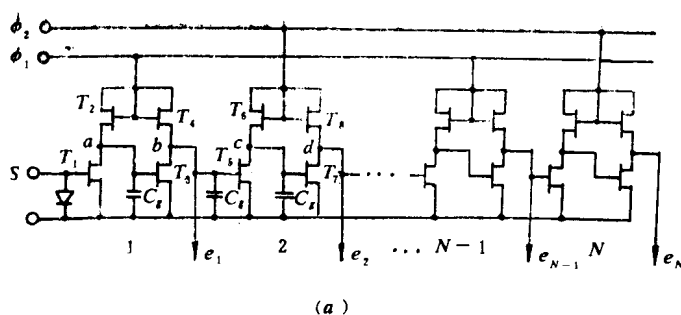


图1-2 普通移位寄存器电路工作原理图
(a) 一种四管单元动态电路 (b) 工作波形

MOS驱动管栅电容的电荷存贮效应，使 c 、 d 点电位在 $t_2 \sim t_3$ 期间继续地保持原状，直到 $T_5 \sim T_4$ 时刻才被迫改变，如此等等。从而在移位寄存器输出端形成依次延迟一拍($\frac{1}{2}\phi$ 脉冲周期)的扫描脉冲，去控制相应的多路MOS开关管，以便串行读出各位二极管上的光电信号。

在实际的移位寄存器结构中，为了减小起始脉冲 S 和移位寄存器末位输出信号对视频信号的干扰，往往在移位寄存器首尾各另加1~2位移位寄存器，使得实际的视频信号从第2~3位移位寄存器输出位置才开始(如图1-2(b)中 V_0 所示)。另外，为了测试和应用方便，往往把移位寄存器末位输出信号引出，称为EOS(End Of Scan)信号，即扫描结束信号。通常，它采用MOS管开漏输出方式提供，当需要用此信号时，可简单地外接一个5k Ω 电阻到地，即可在EOS端得到EOS信号，如图1-2(b)所示。

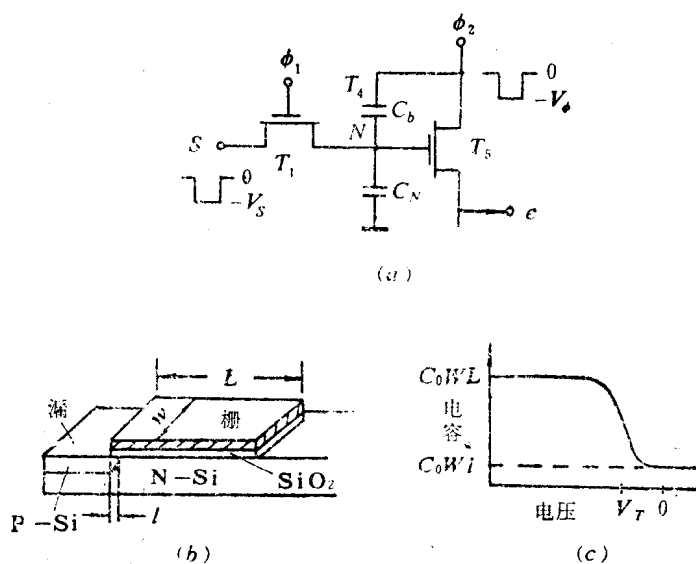
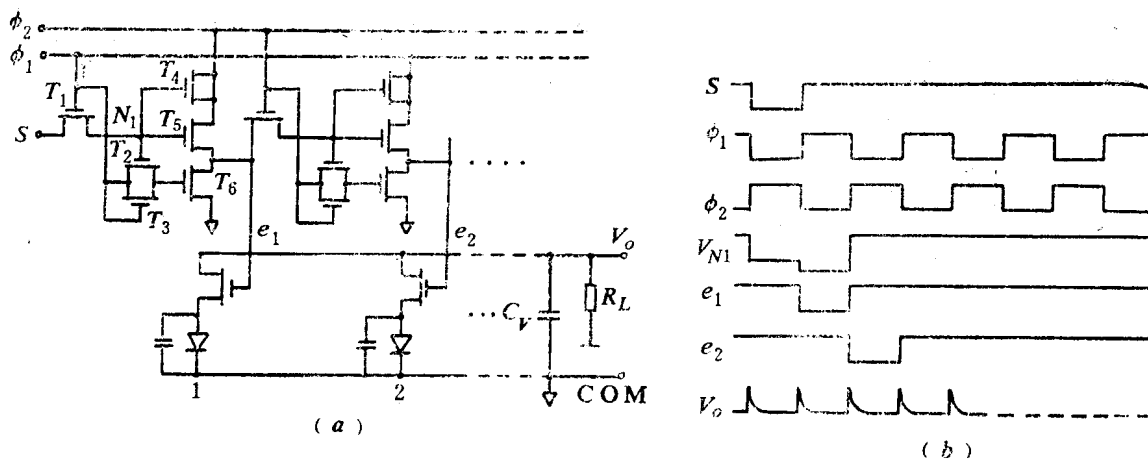
§1-1-3 一种低功耗动态移位寄存器

上述普通四管单元MOS动态移位寄存器扫描电路的缺点是功耗大，且功耗随列阵位数增加而增大，工作速度不易提高，还有列阵首尾视频信号的干扰大。

图1-3是一种采用变容二极管自举电路构成的移位寄存器扫描电路(a)及其工作波形

组成两级反相器(其中 T_2 、 T_4 为“负载管”，其作用相当于一个电阻)，故 a 点波形反相为正($V_a = 0V$)， b 点再反相一次为负(其幅值与 ϕ 脉冲的负电平大小有关，约为 $-7 \sim -12V$)。 $t_1 \sim t_2$ 期间， ϕ_1 变为“正”电平(约为地电位)，第一位移位寄存器由于无供给电源而不工作，但由于 T_3 和 T_5 的栅电容 C_g (以及 a 点和 b 点的寄生电容)的电荷存贮效应，使 a 、 b 两点波形继续保持。 $t_2 \sim t_3$ 时刻， ϕ_1 再次变为负电平，而此时 S 已变为“正”，使 a 、 b 两点电位被迫改变。 b 点的波形即为第一位移位寄存器的输出 e_1 (见图b)。

在 V_0 为负时， T_5 管导通， C 点电位被拉到零电平左右。在这期间，当 ϕ_2 变为负电平时，使 $T_5 \sim T_8$ 组成的第二位移位寄存器工作，由于 $V_0 = 0V$ ， T_7 一直断开，故 d 点电位在 ϕ_2 为负期间也变为负电平。同理，由于相应



该电路移位寄存器的每一位由 6 个管子组成（如第一位移位寄存器由 $T_1 \sim T_6$ 组成），其中 T_4 为变容二极管， N 为存贮节点。这种变容管自举电路的工作原理可用图 1-4 加以说明。图 1-4 (b) 为 MOS 变容管的结构示意图，(c) 为变容管的电容—电压曲线。显然，变容管的电容 C_v 具有两种值：

$$C_b = C_0 W l \quad \text{当 } V_N = 0 \text{ 时} \quad (1-1)$$

$$C_b = C_0 W L \quad \text{当 } V_N = -V_S \text{ 时} \quad (1-2)$$

图1-4 MOS变容管自举电路工作原理

变容二极管“自举”到存贮节点 N 的电压可以用下式表示:

$$\Delta V = \frac{C_b}{C_b + C_N} \cdot V_\phi \quad (1-3)$$

式中, C_N 为存贮节点 N 的寄生电容, V_ϕ 为时钟 ϕ 的幅度。

当存储节点上的电压 $V_N = -V_S$ 时, 变容管栅极下面形成反型层, 使电容 C_s 增大许多, 有效地把时钟电压 V_s 的大部分耦合到节点 N 上, 并与原来的电压叠加 (见图 1-3(b) 中的 V_{N1} 波形), 从而使时钟 (ϕ_1 、 ϕ_2) “满幅度” (即无阈值损失) 地从 T_5 源极输出, 因而可使工作速度明显提高。

这种由变容管自举电路构成的六管单元移位寄存器扫描电路的一大优点，是耗散功率极低。实际上，它是一种无比电路，图1-3(a)中的 T_5 和 T_6 上下两管不同时导通。而且，只有当起始脉冲信号传送到哪一位的节点时，那一位移位寄存器才消耗功率。即整个移位寄存器消

耗的功率,就等于一位寄存器消耗的功率,而与寄存器的位数无关。因而,这种低功耗电路很适合于高位数SSPD器件的扫描电路。实践证明,只要器件的版图设计恰当,用这种扫描电路构成的图象传感器,其视频信号的首尾干扰比普通四管单元电路小得多。

另外,这种电路稍加改变,可以形成一种四管单元的带变容二极管的移位寄存器电路,更适合作高位数SSPD器件的扫描电路用。

§1-1-4 电荷存贮方式工作原理

一、二极管连续工作方式分析

一束光照射在二极管的pn结上,如图1-5所示,将产生光电流 I_L 。假定pn结内把光子转变为电子的效率为 η (称为量子效率)。每秒钟落在单位二极管面积上的 ϕ 个光子所释放的电子数为 $\eta\phi$ 。于是,每秒钟释放的电荷或光电流密度 I_L 为:

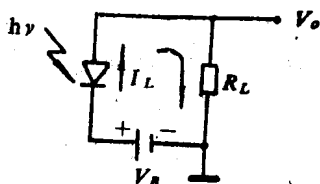


图1-5 连续工作方式电路

$$I_L = q\eta\phi \quad (1-4)$$

其中, q 为电子电荷。根据爱因斯坦提出的光的量子理论, 每一光子具有的能量为 $h\nu$ (h ——普朗克常数, $h=6.62 \times 10^{-27} \text{erg}\cdot\text{s}$, $\nu=c/\lambda$, c ——光速, $c=3.0 \times 10^{10} \text{cm/s}$, λ ——

光的波长), 入射光功率 P 等于:

$$P = \phi h\nu (\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}) \quad (1-5)$$

从(1-4)、(1-5)两式中消去 ϕ , 得:

$$I_L = \frac{q\eta P}{h\nu} (\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}) \quad (1-6)$$

对于面积为 A 的二极管, 其光电流 I_L 为:

$$I_L = \frac{qA\eta e}{h\nu} = \frac{qA\eta \lambda P}{hc} \propto P \quad (1-7)$$

可见, 光电流大小与入射光功率 P (或光强)成正比。

在一般入射光强下, 光电流 I_L 很小。对于结面积很小的二极管(如一般自扫描光电二极管阵列中的二极管), 通常 $I_L=10^{-12} \sim 10^{-6} \text{A}$ 。因此, 为了读出图象信号, 需要很灵敏的探测器, 要求读出放大的增益带宽乘积非常大。而且, 若采用连续工作方式构成图象传感器, 布线上也很困难。而如果采用电荷存贮工作方式代替, 则可以获得很大的增益, 并克服了布线上的困难。

二、电荷存贮工作方式

1. 定性分析

电荷存贮工作方式的基本原理是: 如果把光电二极管的pn结反向偏置到某一固定偏压(一般为几伏), 然后断开电路, 那么, 存贮在二极管电容上的电荷的衰减速度与入射光照度成比例。下面结合SSPD的电路进行分析。

我们取出SSPD中的一位电路来分析, 如图1-6(a)所示。其中, C_d ——光电二极管的等效电容(包括pn结电容和附加的MOS电容), R_L ——负载电阻, V ——视频线偏压, T_i ——

与第*i*位二极管 D_i 相连的MOS FET开关, e_i ——与第*i*位移位寄存器输出的采样脉冲信号。这里暂不考虑视频线等效电容 C_v 。图(a)可转化为图(b)的等效电路。这里, I_D ——二极管在反偏下的暗漏电流, I_L ——光电流(和连续工作方式下的 I_L 相同)。

设 t_1 时刻 e_i 为一负脉冲(见图1-6(c)), 则 T_i 导通, 偏压电源 V 通过负载电阻 R_L 和开关 T_i 使二极管电容 C_d 很快充电到偏压 V , 因而在 C_d 上存贮一电荷 $Q=C_d \cdot V$ 。当 e_i 的负脉冲结束后, T_i 截止, 二极管 D_i 和电路断开, C_d 上充满的电荷逐渐衰减。无光照射时, 光电流 $I_L=0$, 只有二极管的暗漏电流 I_D 使电荷 Q 缓慢泄放。到下次采样脉冲到来时(t_2 时刻), C_d 上放掉的电荷为:

$$\Delta q_0 = I_D(t_2 - t_1) = I_D \cdot T_{int} \quad (1-8)$$

称 $T_{int} = (t_2 - t_1)$ 为采样周期或积分时间, 它就等于起始脉冲周期 T_i , 这就是图1-6(c)中光强 $H=0$ 的一条曲线。室温下, 二极管暗电流 I_D 的典型值小于1pA, 一般可以忽略不计。

当光照射到二极管上时, 产生光电流 I_L , 使上述放电过程加速。在积分时间一定的情况下, C_d 上放掉的电荷 Δq 随着光强 H 的增大而增大, 如图1-6(c)中的 H_1, H_2 等曲线所示。当光强增大到某一光强 H_s 时, 放掉的电荷 $\Delta q_s = I_L \cdot T_s = Q = C_d \cdot V$, 即二极管电容 C_d 上原来充满的电荷 Q 被全部放掉。此后, 即使光强再比 H_s 增大, 放掉的电荷 Δq 也不可能再增加。称 $Q_s = C_d \cdot V$ 为饱和电荷, 而 H_s 为饱和光强, 称 $E_s = H_s \cdot T_s$ 为饱和曝光量。

显然, 如果 $t_1 \sim t_2$ 期间, 光强为 $H(t)$, 光电流为 $I_L(t)$, 都是时间 t 的函数, 则 $t_1 \sim t_2$ 期间光电流放掉的电荷 Δq 为:

$$\Delta q = \int_{t_1}^{t_2} I_L(t) dt = \int_0^{T_s} I_L(t) dt = \bar{I}_L \cdot T_s \quad (1-9)$$

式中, $\bar{I}_L$ 为平均光电流。可见, 与连续工作方式不同, 这里有个积分效应或累积效应, 能使光电信号大大加强。

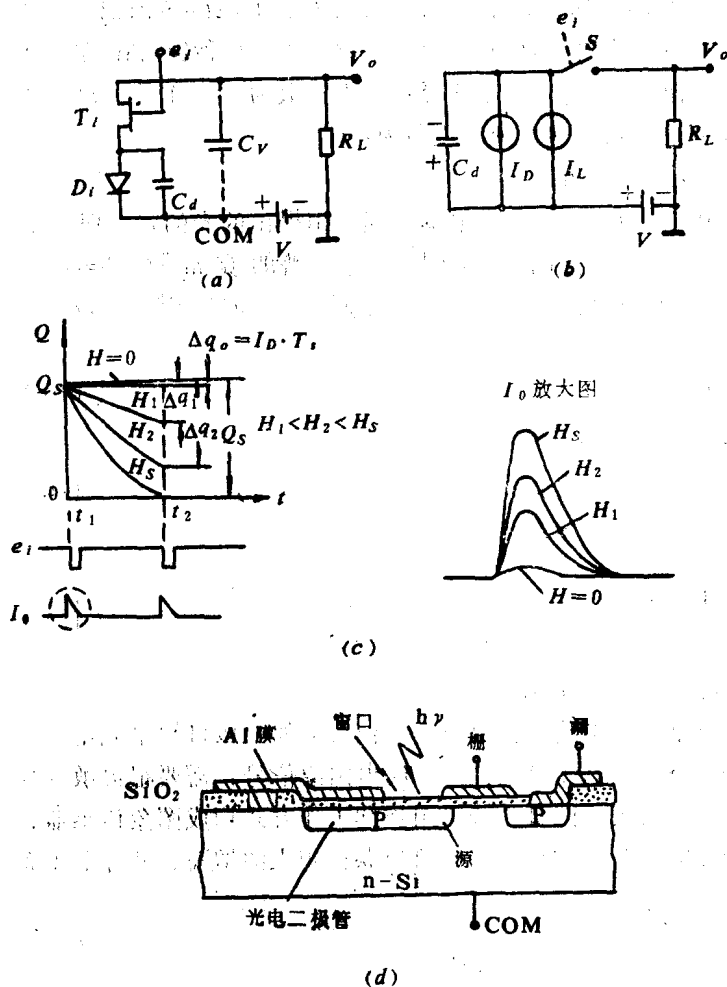


图1-6 电荷存贮方式工作原理图

第二个采样脉冲到来时 (t_2 时刻), MOS开关 T_1 又导通, 偏压源 V 通过负载电阻 R_L 向二极管电容 C_d 再充电, 使之恢复到原来的偏压 V 。显然, 补充的电荷等于积分的时间内 C_d 上消失的电荷 Δq 。再充电电流 I_0 的波形如图 1-6(c) 所示, 其峰值随光强 H 增大而增大。 I_0 在负载电阻 R_L 上产生的电压脉冲就是 SSPD 器件的视频输出信号 V_0 。图中 (d) 是实现电荷存贮工作方式的单元结构图, 这里把 MOS 开关的源极和光电二极管的 P 区合为一体了。

2. 定量分析

上面已经讲到, 二极管电容 C_d 上存贮的电荷 Q 为:

$$Q = C_d \cdot V \quad (1-10)$$

而二极管电容由下式决定:

$$C_d = AMV^{-Z} \quad (1-11)$$

式中 C_d ——二极管耗尽层电容;

V ——二极管上加的偏压;

A ——二极管的结面积;

M ——与半导体材料类型有关的常数:

$$M = [q\epsilon_s \epsilon_0 N_0 / 2]^{1/2} \quad (1-12)$$

式中 ϵ_s ——硅的相对介电常数;

ϵ_0 ——真空介电常数;

N_0 ——硅衬底杂质浓度;

Z ——与二极管类型有关的常数。对于突变结, $Z = \frac{1}{2}$; 线性结, $Z = \frac{1}{3}$ 。

对 (1-10) 式微分:

$$\frac{dQ}{dt} = C_d \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dC_d}{dt}$$

$$\text{而 } \frac{dQ}{dt} = -I_L$$

$$\therefore -I_L = C_d \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dC_d}{dt} \quad (1-13)$$

又根据 (1-11) 式, 有:

$$\frac{dC_d}{dt} = -AMZV^{-(1+Z)} \frac{dV}{dt} \quad (1-14)$$

将 (1-11) 式、(1-14) 式代入 (1-13) 式, 得:

$$-I_L = AM(1-Z)V^{-Z} \frac{dV}{dt} \quad (1-15)$$

由 (1-15) 式得到:

$$-\int_0^{T_s} I_L \cdot dt = AM(1-Z) \int_{V_0}^V V^{-Z} dV \quad (1-16)$$

其中, T_s ——起始脉冲周期 (也即 T_{int}), V_0 —— $t=0$ 时, 二极管的初始反向偏压。由 (1-16) 式得:

$$\begin{aligned} -I_L \cdot T_s &= AM[V^{(1-Z)} - V_0^{(1-Z)}] \\ \therefore V &= \left[V_0^{(1-Z)} - \frac{I_L \cdot T_s}{AM} \right]^{1/(1-Z)} \end{aligned} \quad (1-17)$$

将(1-7)式代入(1-17)式,得到:

$$V = \left[V_0^{(1-z)} - \frac{PT_s \lambda \eta q}{hCM} \right]^{\frac{1}{1-z}} \quad (1-18)$$

公式(1-18)表示,二极管两端电压 V 的衰减与光强 P 和积分时间 T_{int} (即光照累积时间)的乘积成比例。积分时间一定,光强愈大,二极管上的电压衰减愈大。而光强固定时,积分时间越长,二极管上的电压衰减也越大。当二极管通过MOS开关再充电采样时,二极管上的电压衰减就变为相应的充电电流脉冲 I_0 ,它在 R_L 上的压降,即为视频输出信号 V_{out} 。

3. 连续方式和电荷存贮方式比较

在连续工作方式下,直接测量二极管的光电流 I_L 就行了,如图1-7(a)所示。而在电荷存贮方式下(图1-7(b)),根据前面的分析,MOS开关 T 闭合时,前一光积分时间 T_{int} 内二极管电容 C_d 上消失的电荷 $\Delta q = I_L \cdot T_{int}$,从而在二极管电容上产生的压降 ΔV 为: $\Delta V = (I_L \cdot T_{int}) / C_d$ (假定 C_d 为常数),在电阻 R_L 上产生的光电流 I_0 为:

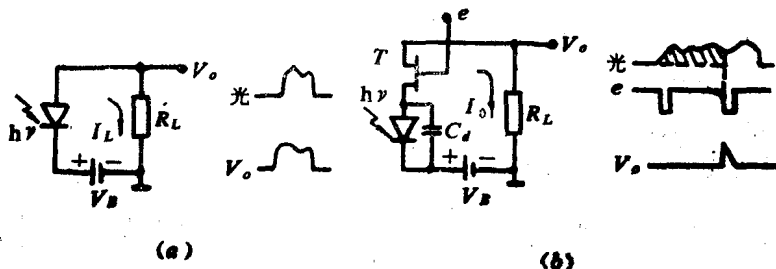


图1-7 两种工作方式比较
(a) 连续方式 (b) 存贮方式

$$I_0 = \frac{I_L \cdot T_{int}}{R_L \cdot C_d} = I_L \cdot \frac{T_{int}}{\tau} \quad (1-19)$$

式中 $\tau = R_L \cdot C_d$,为电路的时间常数。

由(1-19)式可看出,电荷存贮工作方式下得到的光电流 I_0 ,比连续方式下的光电流 I_L 大得多。定义增益因子 G 为 I_0 与 I_L 的比值:

$$G = I_0 / I_L = T_{int} / \tau \quad (1-20)$$

例如,典型的二极管电容 $C_d = 1\text{pF}$,电阻 $R_L = 1\text{k}\Omega$,则时间常数 $\tau = 1\text{ns}$ 。如果积分时间 $T_{int} = 1\text{ms}$,可得到增益因子 $G = 10^6$ 。

可见,在“电荷存贮方式”下工作的SSPD器件,其灵敏度比普通连续方式下工作的光电二极管大得多。而且,可以通过调整积分时间 T_{int} 的长短,来调整传感器的实际灵敏度,以适应对不同光强信号的检测。

从(1-19)式还可看出,SSPD器件输出的光电流幅度与入射光功率 P 成正比($\because I_L \propto P$,见式(1-7))。因而,在积分时间 T_{int} 内,扫描 N 位SSPD器件得到的视频输出信号,是 N 个串行的电流脉冲,每个脉冲幅度与积分时间内照射在相应二极管上的平均光强成正比。这样,SSPD器件就把照射在它的光敏“线”上、按空间分布的光强信息,转换为按时序分布的电脉冲信号,二者一一对应。