

军用电子专题研究报告

机械电子工业部电真空专业情报网

军用摄像器件现状及其发展

一九九二年二月

课题组成员:王嘉富 贾正根 严增濯
总 执 笔:贾正根
执 笔:贾正根 严增濯 葛玉莲 潘忠林
审 核:王嘉富
责任编辑:贾正根 王嘉富

现代战争中,尤其是91年初的海湾战争,所用的现代化装备都装有高精密摄像机,用来制导导弹,探测敌方战场情况与军事动向。可以说摄像机是战场上的“千里眼,顺风耳”。此外,摄像机还广泛用工业、安全监控,广播电视以及人民生活等领域。八十年代以来,摄像机趋向轻便小型化、多功能与高质量。

摄像器件是摄像机的“心脏”,提高摄像机的性能,首先要开发高中型的、高质量的摄像器件。摄像器件有真空摄像管与固体摄像器件两种。近几年来,各国都致力于摄像器件的开发研究工作,研制出许多新型摄像器件。以满足摄像机的要求。

所谓军用摄像器件和民用摄像器件没有什么差别,某一种摄像器件既可用于军用设备,也可用于非军事设备,主要的差别是军用摄像器件要求具有更高的可靠性,耐振性与抗磁性。

真空摄像器件体积大,可靠性差,抗振与抗磁均不如固体器件。加之固体器件迅速发展,因此除微光摄像机采用真空摄像管外,其他都采用固体摄像器件,本文为保证资料的完整性,对真空摄像管做少量的叙述,重点仍放在固体摄像器件方面。

与真空摄像管相比,固体器件具有高灵敏度、高分辨率、高信噪比,能抗强光开花能力,强抗拖影能力与彩色重现性好、体积小、功耗低以及抗磁、抗震等优势,固体器件取代真空摄像管,广泛用于国防、工业自动化、科学研究与人民生活方面。因而固体摄像器件发展极快,仅以日本为例,日本生产的固体摄像机已从1982年的200万台,上升到1990年的1000万台。固体摄像器件除研制出许多新产品外,在工艺技术上也有很大的突破性进展。

本文中固体摄像器件的资料均是1988年以后出现的,内容新颖先进,信息量大,系统全面,对从事摄像机与摄像器件设计制造的工程技术人员,科研人员以及教师,是份难得的资料。

军 用 摄 像 器 件 目 录

一、固体摄像器件 (贾正根、葛玉莲)

- 1.1 固体摄像器件发展概况
- 1.2 固体摄像器件取得的突破性进展
- 1.3 固体摄像器件的种类
 - 1.3.1 CCD摄像器件
 - 1.3.1.1 IT-CCD摄像器件
 - 1.3.1.2 ET-CCD摄像器件
 - 1.3.1.3 FIT-CCD摄像器件
 - 1.3.2 CPD摄像器件
 - 1.3.3 MOS摄像器件
 - 1.3.4 红外固体摄像器件
 - 1.3.5 SIT摄像器件
 - 1.3.6 特种摄像器件
- 1.4 固体摄像器件目前的水平及发展趋势
 - 1.4.1 $\frac{1}{2}$ 英寸CCD器件已成为主流产品
 - 1.4.2 HDTVCCD摄像器件
 - 1.4.3 固体摄像器件目前的水平
 - 1.4.4 固体摄像器件的技术进步
- 1.5 固体摄像器件的优势
 - 1.5.1 固体摄像器件的优势
 - 1.5.2 1989年世界十大公司的60种摄像机一览表

二、军用高灵敏度摄像器件

- 2.1 像增强管和微光摄像级
 - 2.1.1 像增强管的三代产品
 - 2.1.2 微通光板
 - 2.1.3 光电阴极
 - 2.1.4 电子光学系统
- 2.2 高灵敏度摄像管
 - 2.2.1 硅增强靶(SIT)摄像管
 - 2.2.2 次级电子导电(SEC)摄像管
 - 2.2.3 增强型SIT和SEC摄像管
 - 2.2.4 像增强管与视像管耦合而成的摄像管
 - 2.2.5 像增强管与摄像管通过光学镜头耦合型
 - 2.2.6 I-CCD
 - 2.2.7 光电子计数成像系统
 - 2.2.8 冷却型CCD
- 2.3 应用
 - 2.3.1 CCD用于夜间微光观察
 - 2.3.2 HDTV的发展开拓了新的应用领域
 - (1) 军用电影系统
 - (2) 军事教材
 - (3) 实战地图

三、普通摄像管

- 3.1 引言

- 3.2 电子光学系统的改进
- 3.3 普通摄像管
- 3.4 高质量摄像管
- 3.5 红外摄像管
- 3.6 国外摄像管一览表

· 固体摄像器件

近10年来固体摄像器件发展很快,性能不断提高,已广泛的用于各个领域。尤其是广泛的用于各种军事设施中,取代了以前的各种摄像管。使各种军用设施的性能更好,使用更方便,机动性更强,固体摄像器件用于各种精密制导,使导弹命中率更高,机动性更好,飞行速度更快。总之,在精密制导中,使用固体摄像器件,有效地提高了导弹的性能,而且降低了成本。

原则上讲,军用摄像器件和民用摄像器件没有什么差别,某一种摄像器件可用于军事也就能用于非军事。主要的差别,是军用器件要求更高的可靠性、耐振性、抗磁性。

1.1 固体摄像器件发展概况

固体摄像器件不仅在军事上有广泛的应用,它在工业自动化、科学研究以及人民生活等方面,也都有广泛的应用,因而发展极快,我们以日本为例来说明它的发展概况。

图1-1是日本国生产固体摄像机的实绩图。在1982年,其生产量不到200万台,到1988年增加到600万台,1990年增加到1000万台。在这样迅速扩大的市场刺激下,与新技术(主要是精细加工)的支持下,器件向高象质化前进速度很快。

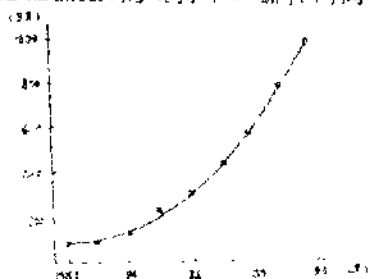


图1-1 日本生产固体摄像机实绩图

1980年,1英寸固体摄像器件中的像素数为19万个,1982年,2.3英寸固体摄像器件的像素数就达到19万个,到1986年,1英寸固体摄像器件的像素数达到120万个(论文水平),到1987年,1.2英寸固体摄像器件的像素数达到33万个。像素数增加的速度是相当快的。固体摄像器件在像素增加的同时,其他性能也有很大提高,获得了一系列突破性进展。

在1987年后,固体摄像器件除各项参数指标进一步提高之外,特别引人注目的是制造器件的成品率,有了质的飞跃,1989年固体摄像器件的成品率是1987年的2-3倍。摄像的最低照度也从原来的1lx降低到4lx,而动态范围进一步增加,由原来的72分贝,增加到80分贝。这就为固体摄像器件全面的逐步的取代摄像管创造了条件,尤其是以前认为对质量要求很高的广播电视领域,也逐步为固体摄像器件所取代。而日本的索尼、松下公司,荷兰的飞利浦公司都在大力试制高清晰度用的固体摄像器件,并已试制出许多产品。

1.2 1987年前固体摄像器件取得的突破性进展

在1987年前,固体摄像器件取得了下列突破性进展,并进入实用阶段。

(1) 灵敏度的提高

固体摄像器件用下列几种方法的一种或几种,有效的提高了器件的灵敏度。

(a) 采用非晶硅连续膜代替光电二极管;

(b) 用光学增透膜,降低了反射;

(c) 增加器件的开口率;

(d) 使用静电感应晶体管放大器。

当时,固体摄像器件的灵敏度已达到或超过普通摄像管。

(2) 动态范围的扩大

固体摄像器件原来未能进入实用化的原因之一是动态范围窄。近来采用下列几种方法,使器件的动态范围扩大到70dB以上。

- (a) 用PCCC法(光电转换特性控制法);
- (b) 采用可控制的线性输出电路;
- (c) 降低器件惰性;
- (d) 降低器件噪声;
- (e) 抑制成荫。

(3) 分辨率的提高

固体摄像器件的分辨率是一项十分重要的参数。它的高低,在很大程度上决定了器件的水平,采用下列措施,有效的提高了分辨率。

- (a) 用锯齿形象素并同时读出两水平行;
- (b) 采用离子注入法;
- (c) 采用电子空穴复合抗开花结构;
- (d) 采用三相水平位移寄存器输出电路;
- (4) 增强抗开花、抗拖影能力。

摄像器件抗开花、抗拖影能力的强弱,直接影响到图象的清晰度与器件的应用。由于固体摄像器件技术上采取了很多有效措施,彻底消除了开花现象,大大降低了拖影,提高了固体摄像器件的竞争能力,扩大了应用范围。常用的抗开花措施有:

- (a) 采用垂直溢流漏结构;
- (b) 采用有溢流控制门的溢流漏结构;
- (c) 采用电子空穴复合抗开花技术。

常用的抑制拖影的方法有:提高转移频率,转移频率越高,拖影越小;用P阱技术,增加P阱高度或增加P阱耗尽层厚度,进一步降低拖影。采用上述措施后,固体摄像器件的拖影水平降得很低,有的甚至做到没有拖影。

在1986年后,固体摄像器件又获得了很大发展,主要表现在三个方面:一是器件分辨率继续提高;二是生产成本大幅度下降和灵敏度继续提高;三是不断开发出新的工艺和新的结构。

1.3 固体摄像器件的种类

固体摄像器件的种类很多,应用的范围也很广泛。在这里,我们仅介绍其有代表性的与应用广泛的器件。

固体摄像器件,从结构上分,有电荷耦合型(CCD)摄像器件、电荷注入型(CI)摄像器件、金属氧化物半导体型(MOS)摄像器件及静电感应晶体管型(SIT)摄像器件。从对光敏感的光谱分,有可见光型和红外型摄像器件从灵敏度高低分,有普通摄像器件。低照度摄像器件从功能分,可分为单功能和多功能摄像器件。

1.3.1 CCD摄像器件

CCD摄像器件是固体摄像器件的主流,生产量最高,应用最广。CCD摄像器件主要有三种:并行读出CCD摄像器件(IT-CCD);帧转移CCD摄像器件(FT-CCD);帧转移并行读出CCD摄像器件(FIT-CCD)。

(a) IT-CCD摄像器件

IT-CCD是interline Transfer-Charge Couple Device的缩写,它是生产和应用较广的一种固体摄像器件。IT-CCD摄像器件称为并行读出CCD摄像器件。它同时读出二个半个水平行,并且象素做成锯齿形的,而不是矩形的。这样,能在不增加象素的前提下,提高水平分辨率,一般可提高1.72倍。

固体摄像器件的分辨率取决于其象素数的奈奎斯特(Nyquist)极限。对矩形结构象素器件而言,若水平象素节距是 P_h ,垂直象素节距为 P_v 时,其奈奎斯特频率,水平方向的是 $1/2P_h$;而垂直方向的是 $1/2P_v$ 。对锯齿形象素而言,其奈奎斯特频率为

若 $Ph \geq 2Pv$
 则 $\xi_h = 1/Ph \dots\dots\dots 1-1$
 $\eta_v = Ph^2 + 4Pv^2 / 4PhPv \dots\dots\dots 1-1$
 ($Ph \geq 2Pv$)

式中, ξ_h 是水平方向的频率, η_v 是垂直方向的频率

若 $Ph < 2Pv$, 则上式变为:

$\xi_h = Ph^2 + 4Pv^2 / 8PhPv \dots\dots\dots 1-2$
 $\eta_v = 1/2Pv \dots\dots\dots 1-2$

李奎斯特极限的斜线方向会降低, 而垂直线不会降低, 因而, 用锯齿形象素, 可以在不增加象素密度情况下, 提高分辨率。

例如, 具有385(H)×490(V)象素的2/3英寸固体摄像器件, Ph 是22 μm , Pv 是13 μm 。对矩形象素和锯齿形象素来说, 计算出的李奎斯特率为: 在水平方向, 分别为290TV和500TV; 在60°方向, 分别为580和400TV。这说明锯齿形象素, 能使水平方向的分辨率增加, 可增加到1.72倍。

IT-CCD的结构如图1-2所示, 它由光电二极管(带有垂直溢流漏VOD)、转移门、垂直CCD寄存器(V-CCD)、水平CCD寄存器(H-CCD)和输出放大器组成。光电二极管连接到垂直CCD寄存器上, 转移门由垂直转移脉冲控制, V-CCD寄存器由四相双时钟脉冲 $\Phi V1 \dots \Phi V4$ 控制, H-CCD寄存器由双相脉冲 $\Phi H1$ 和 $\Phi H2$ 控制, 输出放大器是源跟随放大器, 输出级的浮动扩散电容小于0.03PF保证器件其有高的灵敏度与低的KTC噪声。IT-CCD性能如表1-1和表1-2所示。

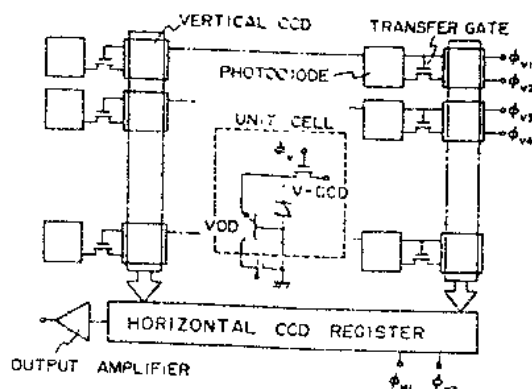


图1-2 IT-CCD结构示意图

表1-1 IT-CCD性能

器件名称 性能	490×510器件	580×500器件
垂直象素数	490	580
水平象素数	510	500
片子尺寸	8.4(V)×10.0(H)mm	
摄像面积	6.6(V)×8.8(H)mm	6.6(V)×8.8(H)mm
垂直节距	13.5 μm	11.4 μm
水平节距	17.2 μm	17.6 μm
垂直时钟频率	15.734KHg	15.625KHg
水平时钟频率	9.5822NHg	9.5156NHg

表1-2 IT-CCD性能

性能	器件名称	490×510器件	580×500器件
垂直开口尺寸		9.5 μ m	7.4 μ m
水平开口尺寸		8.2 μ m	8.6 μ m
开口率		34%	32%
饱和电流		180nA	150nA
暗电流(25℃)		<0.5nA	
拖影(550nm)		<70分贝	
垂直分辨率		480TVL	570TVL
水平分辨率		380TVL	370TVL

表1-3是IT-CCD器件典型器材参数

表1-3 IT-CCD器件典型器件参数

像素数	768(H)×490(V)
摄像面积	8.8(H)×6.6(V)mm
	2/3英寸
像素尺寸	11.5 μ m(H)×13.5 μ m(V)
灵敏度	0.085 μ A/ μ W
饱和电流	250nA
噪声电平	48个
动态范围	68dB
开花	没有开花
极限分辨率	
水平方向	560TVL
垂直方向	480TVL

b) 带有高级检测器的IT-CCD

(1) 带负反馈电荷检测器的1F-CCD摄像器

固体摄像器件要获得更高象质与更小的尺寸,就必须研制出超级电荷检测器或输出放大器,这种电荷检测器或输出放大器,具有高的灵敏度、低的噪声与强的电荷控制能力。

这里介绍一种1/3英寸的并行读出CCD摄像器,它的H-CCD端的电荷检测器是一种具有负反馈的双门浮动面检测器,该检测器还使用了AG1(交变增益倒相)信号处理技术。这种CCD摄像器件主要参数如表1-4所示。

表1-4 带负反馈电荷检测器的1/3英寸CCD摄像器件参数

摄像区	4.8(H)×3.6(V)mm ² , 1/3英寸
片尺寸	7.1(H)×5.1(V)mm ²
像素数	398×492
饱和电压	1.0V
灵敏度	100mv/lx(2856X)
拖影	-70dB
噪声(检测器)	20 μ V
暗电流(20℃)	2fA
动态范围	94dB

由上表可看出，由于使用了新型检测器，器件性能有了很大提高。

这种负反馈浮动面检测器如图1-3所示，它由一个n-型CCD沟道和一个P沟道检测器晶体管构成。从图中还看到，负反馈环实质上是一个倒像器。

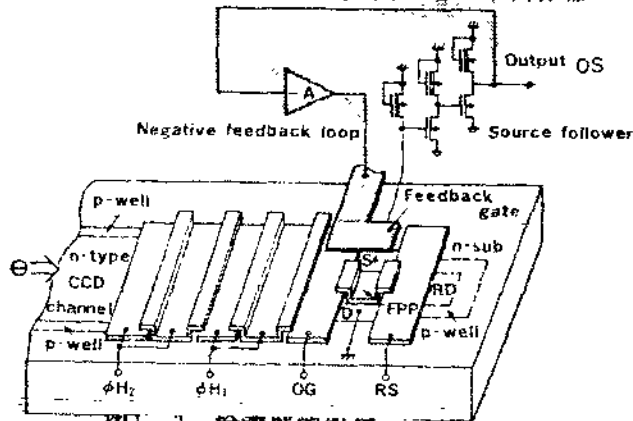


图1-3 检测器的组成

检测器使用负反馈，使信号的饱和电荷增加。其原理如图1-4所示。信号电荷 Q_s 经象素电容 C_a 变成信号电压。图1-4(a)表示开环情况。当加负反馈时，象素电容增加到 n 倍，信号电压压缩成 $1/n$ 倍，如图1-4(b)所示。饱和电荷增加到 n 倍，如图1-4(c)所示。 $n=1+KA$ ，式中 K 是反馈系数， A 是反馈放大器增益。 $K=C_g/C_g+C_c$ ，式中 C_g 是检测器晶体管门电容， C_c 为n型象素沟道的扩散电容。

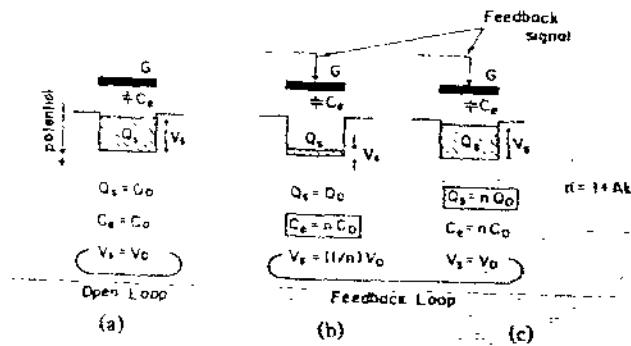


图1-4 负反馈命名饱和电荷增加原理图

采用AG1(交变增益倒相)技术，使噪声大大降低。AG1技术，不仅能有效的降低 $1/f$ 噪声，也能降低KTC复位噪声。

AG1的电路图如图1-5所示，发射极跟随器 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 降低了下级的输入阻抗，互补放大器B的增益为4dB。采用AG1技术后，在100KHz时， $1/f$ 噪声降为原来的 $1/8$ 。

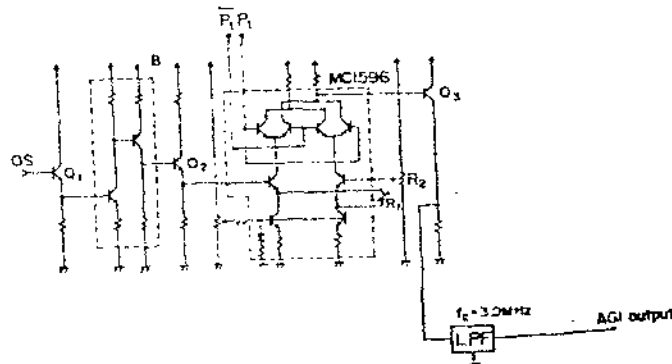


图1-5 AG1电路

图1-6表示, 输入脉冲中 ϕ_{H1} 和RS与输出脉冲OS经AG1处理后的波形SP。在OS中含有声+N, 而经AG1处理后, OS波形化TR和Ts被倒相, 噪声由TN变成-N。在TR和Ts时, 门电压预置于中值。To是时钟周期, 是+TN和Tw之和。负反馈时的-N噪声和信号输出中的+N噪声相抵消, 使噪声减少。

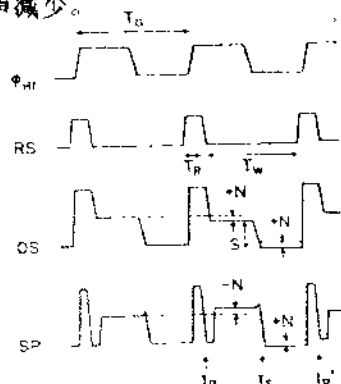


图1-6 经AG1处理后的信号波形

(2) 带负反馈场平面放大器的CCD摄像器件

带负反馈场平面放大器及全耗尽阱的CCD摄像器件具有高的灵敏度、低的噪声、低的驱动电压和大的输出信号。其主要参数如表1-5所示。

表1-5带负反馈场平面放大器的CCD摄像器参数

摄像面积	4.9(H) × 3.7(V) mm ²
像素数无OB	768(H) × 494(V)
有OB	811(H) × 508(V)
像素尺寸	6.4(H) × 7.5(V) μm ²
水平分辨率	420TVL (彩色)
灵敏度	41mV·Lx (2854K)
随机噪声	0.2mV (BW=3MHz, 有CDS)
饱和信号	600μV (线性度在5%之内)
余象	小 0.1%
拖影	-75dB
电子快门	1/60 ~ 1/10000秒

该摄像器件采用埋入沟道的全耗尽阱CCD结构, 提高了H-CCD寄存器的转移效率, 降低了驱动电压。采用负反馈场平面放大器, 获得了高的灵敏度与大的输出信号。

该器件的结构示意图如图1-7所示, 从图看出: 它由光中二极管矩阵、HH-CCD寄存器和输出放大器组成, 而每一个像素由一个光电二极管和一个V-CCD寄存器构成。

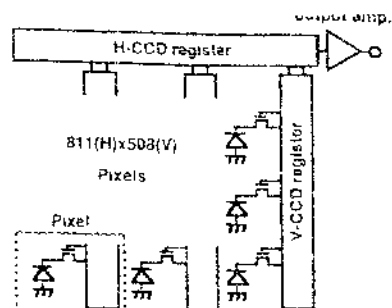


图1-7 带负反馈场平面放大器的CCD摄像器件

图1-8是该器件一个像素的图。(a)是象分布图(b)是象素剖面图。从图(a)看到:光电二极管宽 $1.9\mu\text{m}$, V-CCD寄存器宽 $1.5\mu\text{m}$;从图(b)看到:每个象素都有一个垂直溢流漏(VOD)结构,可抗强光开花。光电二极管由P-阱的n层形成,由在硅表面的P'层屏蔽,以减少暗电流和余象。光电二极管和V-CCD沟道用注入硼离子来隔离。

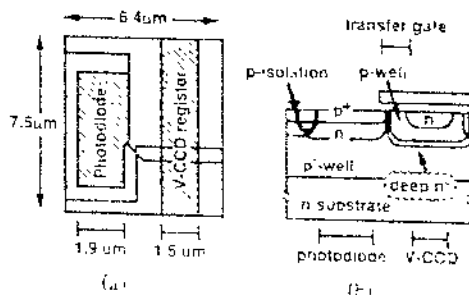


图1-8 一个象素的图

有效摄像面和尺寸缩小,使光电二极管和V-CCD尺寸均缩小。光电二极管尺寸缩小,又使灵敏度与最大电荷控制能力下降,V-CCD尺寸缩小,使转移效率和最大电荷控制能力退化。采用深沟道完全耗尽阱CCD结局,既有最大的电荷控制能力又有高的电荷转移效率。

负反馈场平面放大器(FFPA)结构

FFPA输出放大器的电路如图1-9所示,由三级源跟随放大器组成,以保证有足够高的截止频率。

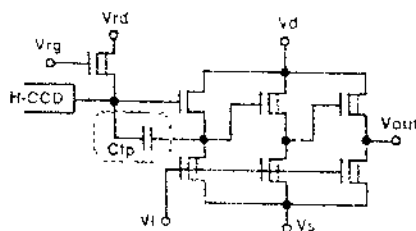


图1-9 输出放大器电路

输出放大器的设计关键是第一级,表1-6比较了三种不同结构的第一级源跟随放大器的电路。第一种是Locos(局部氧化)放大器,门宽由 W 增加到 $W+\Delta W$,以补偿跨导的减少,因而它的输出电容 C_j 增加到 $C_j(1+\Delta W/W)$ 。第二种是场平面放大器,使用了场平面绝缘,跨导没有减少。这两者中结构均有相同的灵敏度。第三种是FFPA放大器,它能增加灵敏度,并使分布电容从 C_p+C_{fp} 下降到 $C_p+(1-G)C_{fp}$, C_{fp} 是寄生电容, C_p 是另一种寄生电容。

表1-6 三种不同的源跟随放大器第一级

	Locos	Field plane	FFPA
Circuit diagram			
Schematic cross-section			
Output capacitance	$C_p + C_{fp}$	$C_p + C_{fp}$	$C_p + (1-G) \cdot C_{fp}$
Input capacitance	$C_i + C_{fp} \cdot (1 + \Delta W/W)$	C_i	C_i

采用FFPA后, 噪声降低, 对比度提高; 输入电容降低, 从原来的9.4F降低到6.7F; 信噪比改善2.9dB; 输出放大器的灵敏度提高到16.2uV/电子; 最大像素电荷控制能力达到92000电子/像素; 抗开花能力达到饱和照度的500倍。

c) FT-CCD是Frame-Transfer charge couple Device的缩写, 也是一种广泛使用的固体摄像器件。图1-10是带有滤色器的FT-CCD器件, 它由摄像区、信号储存区和输出寄存器三部分组成。在摄像区表面上, 有条形三色青绿黄(Cy-G-y)三色吸收滤色器, 滤色器信号分别由上、中、下水平输出寄存器输出, 然后再送到输出放大器放大。

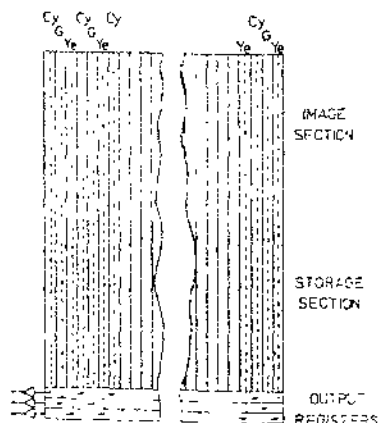


图1-10 带有滤色器的FT-CCD

该器件最大特点是摄像区和储存区分开。光电二极管中产生的信号电荷先转移到储存区对应的寄存器中, 待一帧信号都储存到储存区后, 再由储存区迅速的读出。这样, 不仅转移效率高, 而且拖影小, 很显著地提高了图象质量。其缺点是摄像区仅占全部有效面积的1/2, 即器件开口率不超过50%, 使器件的灵敏度下降。

d) FIT-CCD摄像器件

FIT-CCD是Frame interline transfer charge couple Device的缩写, 我国称帧储存并行读出CCD摄像器。其基本结构如图1-11所示, 它由储存区、摄像区与读出区构成。储存区由一对垂直BCCD寄存器及几个空位(避免拖影电荷)组成, 垂直BCCD寄存器位于摄像区和水平读出CCD寄存器之间。摄像区由光电二极管和V BCCD寄存器构成。在摄像区和储存区之间还有选择门和漏区。

FIT-CCD摄像器, 具有FT-CCD和IT-CCD两者的优点, 即同时具有分辨率高和拖影低的优点。在50倍饱和光照下, 拖影降低到0.45%。其抗拖影能力是极强的。

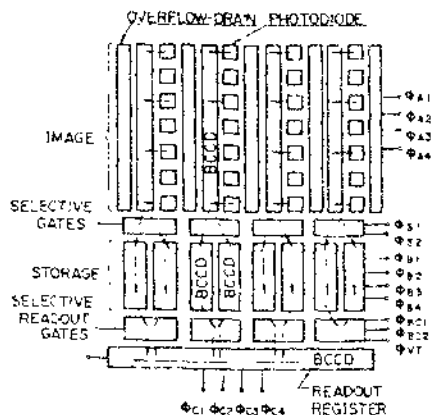


图1-11 FIT-CCD结构图

表1-7 是FIT-CCD摄像器件的参数。由于该器件有很高的性能, 差不多高质量的摄像机, 都采用FIT-CCD摄像器作光敏元件。

表1-7 FIT-CCD摄像器件的参数

参数名称	参数值
摄像面的对角线	8mm
片子尺寸	7.6mm $\times$ 29.8mm
行数	488
每行像素数	774
像素尺寸	8.5 μ m(H), 19.95 μ m(V)
串联寄存器数	3(R, G, B)
VDD	12V
I DD	5mA
输出阻抗	600 Ω
时钟脉冲Vc(最大、最小)	+1V, -9V
时钟频率(串联)	4.77MHz
时钟频率(并联)	3.58MHz
饱和输出	400mV
饱和电流	180nA
动态范围	70dB
电荷变换系数	4uv/e
噪声信号	30电子
抗开花性	7200倍
拖影	1.7×10^{-4} 像素
饱和灵敏度(6500K)	7.8Lx(有红外滤波器)
暗电流	0.1nA
均匀性	1.2%
电荷转移效率	99.988%

1.3.2 CPD摄像器件

CPD是Charge priming device的缩写, 中文叫电荷注入器件。

CPD摄像器件的优点是灵敏度高, 缺点是暗电流大。MOS摄像器件优点是没有余像, 动态范围宽, 其缺点是有固定模式噪声。CPD摄像器件是MOS摄像器和CCD摄像器的混合体, 它兼有两者的优点, 有较高的灵敏度, 又有X-Y矩阵选址的优点(MOS开关结合CCD读出移位寄存器)。这就使CPD摄像器具有动态范围宽, 没有余像滞后和低的噪声(没有固定模式噪声)。

CPD采用电荷注入转移耦合器(CPT), 有很高的转移效率。

CPD的结构, 如图1-12所示。CPD摄像器由光电二极管和MOS开关对组成。水平读出部分由BCCD寄存器, 输入电路和浮动扩散放大器组成。

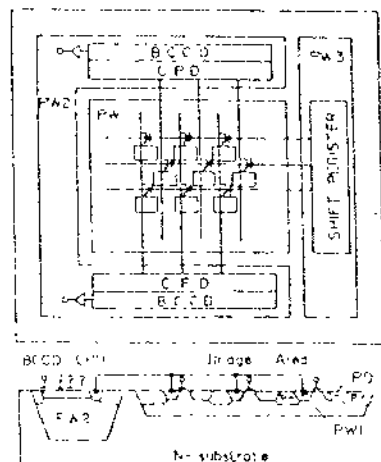


图1-12 CPD摄像器结构图

图1-13是CPT工作原理图，其(a)是CPD摄像器的剖面图，(b)是脉冲定时图，(c)是CPT工作时的电位变化说明图。CPD工作时，当 $t=t_1$ ，信号电荷 Q_s 储存在光电二极管PD中。当 $t=t_2$ ，垂直MOS开关电极 TG_1 处于正的高电位(偏压)，使信号电荷转移到垂直透明电极L上，当 $t=t_3$ 时，电极 V_G 再变成零电位，信号电荷仍然在垂直透明电极L上。当 $t=t_4$ 时， TG_1 成为高电位，使储存在 C_v 中的注入电荷转移到垂直透明电极L上。当 $t=t_5$ 时，因电极 T_c 成为高的正电位，信号电荷和注入电荷集中于电极 T_c 下面的电位阱上，这就叫做埋入沟道注入转移。

当 $t=t_6$ 时，电极 TG_1 成为0电位，同时电极 TG_2 是高电位。在BCCD中，外部偏置电荷注入电容 C_N 中，这时，信号电荷、注入电荷与外偏置电荷都储存在 C_N 中。

当 $t=t_7$ 时，电极 TG_2 中等偏置，电极 T_c 零偏置时，信号电荷及外偏置电荷都扫出BCCD这个过程，叫做埋入清道扫出转移。

当 $t=t_8$ 时，电极 TG_2 电压再变成零偏压，埋入沟道CPT。

应注意到：电荷转移效率(从光电二极管到转移线)超过99%，这是因为电荷转移不经过BBD(表面沟道)而是经过MOS开关转移器。转移线电容 C_L 是光电二极管电容的150倍。

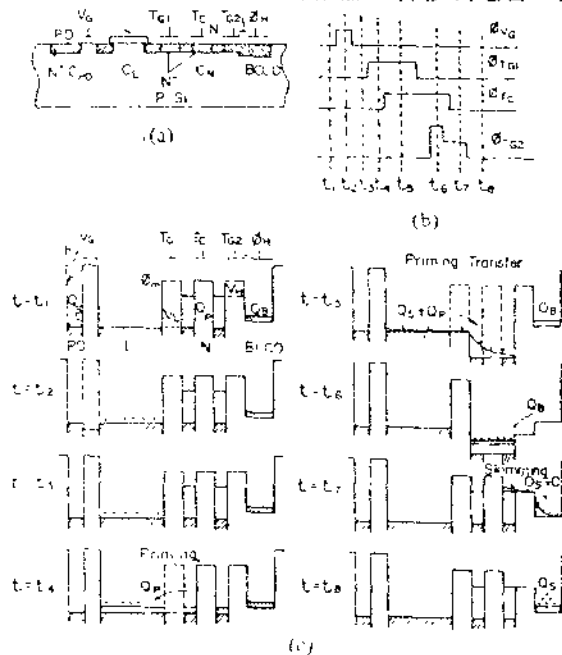


图1-13 CPT工作原理图

- (a) 是CPD器件剖面图
- (b) 是定时脉冲
- (c) 电位变化

图1-14是CPD摄像器n-p-n光电二极管中的电位分布(水平和垂直方向)。当光电二极管中储存的电荷太多时，电位曲线从PQS向Pof移动。把衬底n层中的电位和n层中的电位定义为溢流电位，当 $V_{sub} = \phi$ 时(如图1-12所示)，光电二极管中信号电荷就流向衬底n层，有效的抑制了开花。

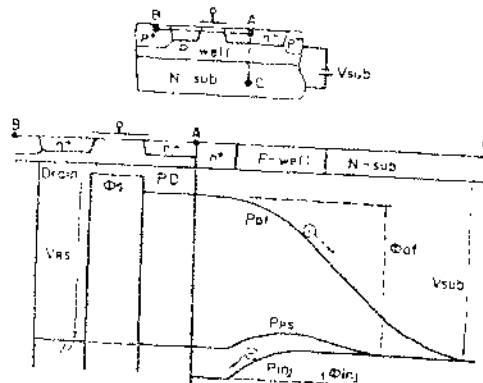


图1-14 CPD光电二极管中的电位分布

1.3.3) MOS摄像器件

以前普遍认为MOS摄像器件灵敏度和分辨率不易做高,对MOS摄像器件开发不力。但MOS器件具有图像质量易做高,驱动电压低和驱动简单的特点,最近,又受到制造厂家的重视,使MOS器件(1/2英寸)像素数从原来的18万左右增加到39万个。灵敏度也提高20dB,基本上满足了使用的要求。新开发出来的MOS摄像器件有下列特点。

- (1) 读出噪声小,图像质量高;
- (2) 使用TSC结构,无拖影(TSC—横向信号引线);
- (3) 使用X、Y直接选址,功能强;
- (4) 驱动电压低,结构简单;
- (5) 驱动电路频率低,采用无时钟脉冲的0相位和 π 相位读出技术,成本低。

2/3英寸MOS摄像器件参数如下表所示。

表1-8 2/3英寸MOS摄像器件参数

	E.A	CCIR
像素数	510×492	500×582
像素数面积 μm^2	17×13	17×11
动态范围dB	90	70
分辨率(彩色)	330TVL(H)	330TVL(H)
暗电流nA/cm ²	0.24~0.43	0.24~0.43

目前,MOS摄像器件的又一大进步是开发出有自动曝光功能的器件。这就能大大简化整机结构,降低成本,又有较强的功能,为摄像机的智能化迈出了关键的一步。表1-9是最近开发出来的MOS摄像器件。

表1-9 新MOS摄像器件参数

类别	型号	有效面积(mm ²)	像素数	灵敏度(nA/Lx)	备注
单片	HE98245	6.6×8.8	485×570	19	可变
彩色	HE98247	"	577×570	16	
	HE98249	"	491×760	16	
	HE98249	"	491×675	28	
单片	HE98236A	3.3×4.4	243×324	20	
单色	HE98246	6.6×8.8	491×649	70	
	HE98268	"	581×767	55	
	HE98238	3.3×4.4	288×324	20	

1.3.4) 红外固体摄像器件

这里介绍的红外固体摄像器件, 主要指肖脱基势垒红外摄像器件, 介绍它的基本工作原理、结构、近期取得进展及目前达到的水平。

红外摄像器件, 由于作用距离远、穿透云、雾、雨、雪能力强, 在军事上、工业自动化与家庭防盗等方面, 都有广泛的应用。另外, 红外摄像器件也是一种热成像器件, 在医学、电力、防火等方面, 也有广泛的应用。肖脱基势垒红外摄像器件出现以来, 发展很快, 到目前已作出水平较高的肖脱基势垒红外摄像器。用于短波红外(SWIR)1到3 μm 、中波红外(MWIR)3到5 μm 和长波红外(LWIR)8到10 μm 。

a) 肖脱基势垒红外摄像器件的工作原理

红外线从器件背面射入, 由于红外线能量 $h\gamma$ 小于硅的禁带宽 $E_g=1.1\text{eV}$, 能穿透硅衬底, 达到PtSi层。红外能量被PtSi层吸收后, 产生电子空穴对。“热”空穴有足够能量时, 能穿过势垒, 注入硅衬底。同时电子(负电荷)跑到衬底的另一边电极上。电极上的负电荷(红外信号)传到CCD读出。从CCD读出的红外视频信号, 可以是脉冲的, 也可以是连续的。要实现上述过程, 必须是:

$$\phi_{ms} < h\gamma < E_g \quad (1-3)$$

式中: ϕ_{ms} —肖脱基势垒

$h\gamma$ —红外能量

E_g —硅半导体禁带宽

肖脱基势垒摄像器的响应率 R 可表示为:

$$R = C_1(1 - \phi_{ms}\lambda^{-1})^2 \quad (1-4)$$

式中 R 为响应率, 用 A/W 表示, A 为光的吸收率(光检测层), 它是波长的数。

C_1 是量子效率系数。用 $1/\text{eV}$ 表示。 ϕ_{ms} 用 eV 表示。 λ 为波长。

根据发射模式, 在具有无限厚的金属层时, C_1 可用下式表示:

$$C_1 = 1 + 8(E_f + \phi_{ms}) \quad (1-5)$$

式中, E_f 为费米能级。对很薄的PtSi层, C_1 成为:

$$C_1 = A(\lambda)G(\lambda) / \phi_{ms} \quad (1-6)$$

式中, $G(\lambda)$ 为内部注入有效增益。

对20埃厚的PtSi层, 由公式1-6算出的 C_1 值测量的 C_1 值一致, 而公式1-5算出的 C_1 值偏低些。

在反偏置下, 暗电流不仅和 ϕ_{ms} 有关, 还和工艺条件与衬底掺杂状态有密切关系, 对于高质量的PtSi层器件, 暗电流是工作温度和偏压的函数, 工作温度越高, 暗电流越大, 偏压越大, 暗电流也越大。

根据公式(1-3), 推出截止波长 λ_c 为

$$\lambda_c = 1.24 / \phi_{ms} \quad (1-7)$$

(b) 肖脱基势垒红外固体摄像器的最近进展

肖脱基势垒红外摄像器件的进展主要表现在: 要用光学谐振腔, 与对不均匀性的校正技术, 改进制造工艺, 提高器件的开口率等, 有效的提高了器件性能。

1) 光学谐振腔

光学谐振腔的结构如图1-15所示。从图1-15看到: 在P型硅的前面, 是一层抗反射层 SiO_2 , 厚度约3300埃。检测层PtSi厚约20埃, 介质层 SiO_2 厚度约埃最后一层是反射层Al。红外光从背面入射到抗反射层上, 全部透过抗反射层和硅衬底, 到达检测层, 一部分被吸收, 产生电子空穴对, 剩下部分透过介质层, 到达反射层, 再从反射层反射回来(反射有 π 相移)如经过介质层有 90° 相移。这样二次经过介质层回到PtSi层的光, 和入射光同相, 产生驻波, 使光的吸收率最大, 这就有效的提高了器件的响应率。采用光学谐振腔和薄的检测层后, 可以使响应率提高一个数量级, 可见效果是极好的。

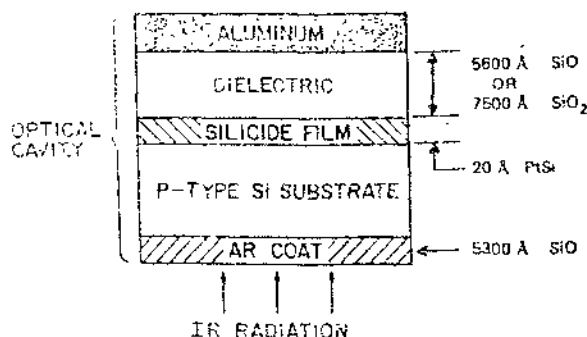


图1-15 光学谐振窗结构

2) 采用薄检测层

厚的检测层响应率低，用薄的检测层(25埃厚)会使响应率大大提高。薄PtSi层的具体做法是在(100)P型硅片上，蒸发一层厚度约9埃的Pt层，然后在真空中退火10分钟，Pt在退火中扩散，形成25埃厚的PtSi检测层。这样的检测层有较高的响应率。

3) 对不均匀性的校正

对不均匀性进行校正后，有利于提高图象质量，提高图象清晰度。例如，160×240PtSi红外摄像器件不校正时，300K背景信号高空间不均匀性在1-2%范围内。若使用16级参考信号校正器后，不均匀性降低到0.18%。

4) 提高器件的开口率

器件开口率高，响应率自然高些，对红外肖脱基势垒摄像器件，提高开口率的方法是：采用自校准工艺；提高光刻精度和光刻水平。光刻达到2μm水平时，PtSi摄像器件的开口率最高达到60%，一般的也能达到40%。

表1-10是1983年以后，开发出来典型肖脱基势垒红外摄像器件的参数。

象素数	象素尺寸 (μm)	开口率 (%)	肖脱基 势垒高 (eV)	敏感 材料	开发时间	公司
64×64	18×170	2.3	0.23	Ptsi	1983	Fujiitsu
256×256	27×31	2.5	0.26	Ptsi	1983	松下
64×64×160	20×15	5.6	0.23	Ptsi	1983	松下
160×240	80×40	3.7	0.22	Ptsi	1983/1985	DSRC
172×2	10×20	70-80	0.375	Pdsi	1985	DSRC/RCA
64×128	120×15	1.9	0.26	Ptsi	1980	Valvo
172×512	26×20	3.9	0.22	Ptsi	1986	松下
160×240	80×40	6.0	0.22	Ptsi	1987	DSRC
320×240	40×40	4.3	0.22	Ptsi	1987	DSRC
256×256	30×30	8.5	0.22	Ptsi	1987	Hushes
128×128	60×40	4.2	0.23	Ptsi	1987	EGG
4096×4	10×10	10.0	0.22	Ptsi	1987	松下
512×512	26×20	3.9	0.17	Irsi	1987	松下