

作为图像传感器的 CCD、ICCD 和 IRCCD

于 前 洋

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 本文评述了作为图像传感器的 CCD、ICCD 和 IRCCD 的最近进展, 提出了它们在极低噪声、微光和红外等环境下应用的潜力。

关键词: 图像传感器; 电荷耦合器件; 增强电荷耦合器件; 红外电荷耦合器件

1 引 言

CCD 是电荷耦合器件的缩写。它是一种半导体器件, 其上有能贮存信号电荷的 MOS (金属、氧化物、半导体) 层。当对其施加有适当次序的时钟脉冲时, 用光或电方法激励产生的电荷包便能在 CCD 器件内作定向传输。利用这种机理, 这种器件能执行多得惊人的电子功能。由于它的概念和制造工艺以及有关的技术, 与近代集成电路的研制与生产紧密相关, 因此随着微电子工业的蓬勃发展和大规模、超大规模集成电路 (LSI、VLSI) 的商品化, CCD 器件得到异常迅速的发展, 在广泛的领域内获得成功的应用。

CCD 的应用可以分成两大类, 即应用于信号处理和图像传感。

将 CCD 应用于信号处理, 是基于这样的特性, 即器件能提供对模拟信号的存储和精确时钟控制的时间延迟。它在这一领域内的主要应用计有: 模拟延迟器、多路转换器、递归滤波器、横向滤波器、相关器、模拟存储器。

由于半导体硅材料对辐射敏感, 因而光子的入射能激励电子以产生电荷包, 这是 CCD 本质上能作为图像敏感器件的基础。自从 1970 年美国贝尔电话实验室的 Boyle、Smith 宣布制成第一片 CCD 器件以来, 至今虽仅二十余年的时间, 但这一器件的技术却在成像器件领域内获得了难以预料的广泛应用, 这已成为举世公认的事实。由它取代传统的以电真空技术为基础的电子摄像器件, 除了在少数特殊应用场合外, 也已是一种必然的趋势。这是由于, 与传统的摄像器件相比, 它具有以下特点: 全固态、结构紧凑、可靠性高; 体积小、重量轻; 不需要高电压; 功耗小; 无畸变; 无滞后; 动态范围宽; 光谱响应宽; 分辨率高; 自扫描。

目前, 作为图像敏感元件的 CCD, 已成功应用于下列领域: 天文观察与成像航空和航天

遥感、X 线成像、医用成像与生物成像、荧光光谱与成像、粒子探测器、彩色拷贝系统、机器视觉与机器人、微光监视系统、全球监视、预警、捕获、跟踪、拦截系统 (SDI) 和制导。

以下各节,将对 CCD 成像器件及技术的最新近展及在向低照度 (ICCD) 和长波方面 (IRCCD) 扩展状况作一综合评述。

2 作为图像敏感器的 CCD

2.1 基本结构及进行方式

CCD 作为图像敏感器使用时,其基本结构及运行方式有以下三种:

2.1.1 线阵 CCD

图像从垂直于器件像元排列的方向扫描以记录在线阵 CCD 上。读出时,每个成像的 CCD 像元,将电荷包转移到移位寄存器的一个单元(一个字,而不是一位),沿水平方式快速读出。

2.1.2 面阵帧转移 CCD

成像单元与移位单元整帧地分开。在成像的积分时间内,CCD 像元的一半面积记录图像。然后,在回扫时间内快速转移到挡光的另一半面积的像元(移位寄存单元)上。对后一半像元以常规视频速率读出的同时,下一帧图像的积分开始进行。

2.1.3 面阵行转移 CCD

每两行成像单元之间都夹有一行不透明的移位寄存单元。在成像时间内,传输门关闭,电荷包在成像单元上积分,不向寄存单元转移,已转移到寄存单元上的前一帧图像以视频速率读出。当传输门开启时,每行成像单元上存贮的图像电荷同时转移到对应的行间读出寄存器上。

除以三种基本结构外,还有一种时间延迟积分 (TDI) 方式。它综合地利用了 CCD 器件的模拟信号处理和图像敏感功能,使信号电荷包沿移位方向进行延时累加,从而在不损失空间分辨率的前提下,提高器件的灵敏度。同时,也可以完成一些特定的光电信号处理功能,如卷积与相关。

2.2 CCD 图像敏感器及其应用技术的最新进展

2.2.1 高度集成化与像元数的剧增

第一片可用的面阵 CCD 商品器件由 Fairchild 公司生产,像元数为 100×100 。不久,满足与通常电视格式兼容要求的像元格式,即 512×320 (V×H) 相继问世。1987 年前后, 512×512 格式成为实用中最多像元的 CCD,更多像元数的必须订制。极高的电荷转移效率打开了研制超大规模 CCD 的大门。现在, 1024×1024 已被考虑选作科学级成像 CCD 的标准格式。 2048×2048 器件已被 Kodak, Tektronix 和 Ford 公司制出,并用于天文观测中。Ford 公司近期研制出的 4096×4096 CCD^[1],像元尺寸 $7.5 \mu\text{m}$,其像元数超过 100×100 CCD 的 1600 倍,即将集成度提高了三个数量级。

由于微细加工技术和工艺的进展,目前已采用 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 的图形设计尺寸生产 1Mb 以上的 DRAM,这一技术完全适用于硅 CCD 器件的制作。采用 $1.5 \mu\text{m}$ 图形加工技术,目前 CCD 像元中心距已做到 $(7-8) \mu\text{m}$,做到 $4 \mu\text{m}$ 也是完全可能的。

线阵 CCD,如 Fairchild CCD 191,像元数 6000。加拿大遥感中心 (CCRS) 曾用来作飞行试验^[2]。视场 70° ,在高程 12km 处,给出 2.8m 的地面分辨率,而每次推扫条带宽 16.8km。

在高程 1.07km 处, 飞行速度 80m/s 时, 给出 25cm 的地面分辨率。

Tektromix 公司推出的科学级 CCD^[3], 其两种典型器件的性能如表 1。

表 1 Tektronix 公司的典型产品

格式	512×512	2048×2048
成像面积 mm ²	13.8×13.8	55.3×55.3
像元尺寸 μm ²	27×27	27×27
暗电流	<2-10nA/cm ²	
量子效率	>40%	(400nm)
	>70%	(700nm)
动态范围	≈70, 000	
线性度	<0.5%	

Ford 航天公司自 1985 年开始生产科学级面阵 CCD 图像敏感器, 1989 年推出两种甚高分辨率的器件^[4], 见表 2。

表 2 Ford 推出的科学级甚高分辨率 CCD

格式	2048×2048	4096×4096
成像面积 mm ²	15.36×15.36	30.72×30.72
像元尺耐 μm ²	7.5×7.5	7.5×7.5
暗电流 (27℃)	<25PA/cm ²	
电荷转移率	99.9999%	
量子效量	44%	(650nm)

Eastman Kodak 微电子技术部近五年在 CCD 器件集成度和像元数上的迅速推进情况, 从表 3 上可见一斑^[5]。

表 3 Eastman kodak 器件水平的进展

型号	年代	像元数	像元尺寸 μm	成像面积 mm
KAF-1400	1987	1340×1037	6.8×6.8	8.98×7.04
KAF-4200	1989	2048×2048	9.0×9.0	18.4×18.4
KAF-1300	1990	1280×1024	16×16	20.5×16.4
KAF-1600	1990	1552×1032	9.0×9.0	14.0×9.29

2.2.2 拼接技术的进展与全谱段图像敏感器

由于技术和经济上的多种原因, 单片 CCD 的面积不可能做得过大。目前水平为边长 (5

—6) cm 量级。拼接(镶嵌)技术可以将多个 CCD 芯片连接起来得到更大的成像面。拼接技术的发展是由于下列三个因素的推动:

获得大的成像面积;

便于并行处理;

多谱段器件的拼接可灵活地构成全谱段图像敏感器。

早在 1983 年, 林肯实验室为改善陆基光电深空监视系统的性能, 就将四个锥形光纤束与粘联的四片 CCD 形成了镶嵌的焦平面, 其接缝宽仅 $50\mu\text{m}$, 即实际上是无缝拼接。

1984 年, 加拿大北部电信电气公司和美国 Itek 公司用 5 片 2048×96 的 735A 型 TDI CCD 器件, 拼接成 130mm 长的 E57B 摄像器件, 总像素结构为 1024×96 。

1991 年, Smithsonian 天体物理观测站用 4 片 2048×2048 的 CCD, 按 2×2 的结构拼接成边长为 61mm、死区 $400\mu\text{m}$ 的器件, 获得 4096×4096 的 CCD 镶嵌成像器件^[6]。

值得注意的是, 这种日益发展的灵活的并接技术, 使复盖宽阔光谱段的全谱段图像敏感器成为可能。如 1986 年“RCA 评论”上报道了 4×5120 和 2×2560 的混合拼接阵列构成的可见—近红外—短波红外波段的焦面组件, 它是由四片拼接式可见近红外线阵(每片又由 5 片 1024 像素的 CCPD 构成)和两片拼接式短波 IRCCD(每片又由 5 片 512 像素的 IRCCD 构成)混合拼接而成的。其高分辨率、大成像面积、宽光谱响应、在军事应用上是十分有价值的。

2.2.3 敏感谱段复盖从软 X 射线到近红外

由于光子入射, 即激励出 CCD 电荷包的信号, 因此 CCD 的响应波长可从 0.1nm 到 1100nm, 即复盖四个数量级。(对于短波工作, 可用减薄了的背面照射工作的器件, 其软 X 线到近红外谱段的量子效率可做到高于 50%) 这样一来, CCD 器件可以用于从软 X 线、真空紫外、紫外可见和近红外谱段的直接成像。

如果把芯片上的电路噪声压缩到 1 到 2 个电子的范围, 则将 CCD 用于极低能的软 X 线真空紫外成像光谱仪, 低能荧光成像也是可能的。(在标准电视应用中, 这一噪声为 30 到 150 电子。在慢扫描方式下, 商品 CCD 的噪声为 25 到 50 电子。天文用 CCD 为 7 个电子, 实验室专用 CCD 的噪声水平为 4 个电子。1990 年, Ford 航天公司为超低信号电平的成像和光谱仪专门设计的 CCD, 其噪声基底仅为 0.5 个电子的均方根值^[1]。

对于波长短于 100\AA 的光辐射, CCD 器件具有优于光电阴极/光电倍增器的光子计数灵敏度。当波长短于 10\AA (能量 $>1000\text{eV}$), 现有 CCD 可以 150eV 的精度直接测量光子能量。随着噪声性能的改善, 精度可提高到 50eV 。

3 带图像增强器的 CCD—ICCD

3.1 CCD 在微光下的工作

在常温下以标准电视体制工作的面阵 CCD, 其灵敏度(景物照度)可作到 $1-0.1\text{lX}$ 。进一步提高在微弱光照条件下的灵敏度, 在实验室或某些特殊条件下可用致冷和延长积分时间(采用慢扫描体制)的办法。若在常规或严酷环境下使用时, 则必须使用适合微光下工作的 CCD 成像器件。

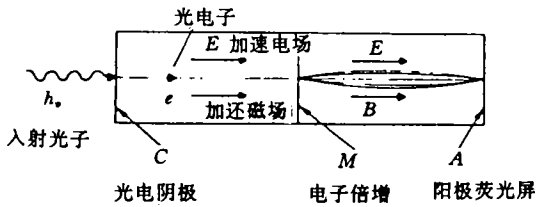


图 1 像增强器信息过程示意图

为了使 CCD 器件以足够的分辨力在微光下成像，目前有三条技术途径：

- 采用 TDI 方式工作的 CCD；
- 直视型 CCD (CCID)；
- 增强型 CCD (ICCD)。

前两种途径仍采用光子直接激发。由于信号电平低，必须减小噪声，

往往需要致冷。然后，再用时间延迟积分或慢扫描方式来提高信号电平，改善信噪比。

增强型 CCD (ICCD)，不用信号光子直接激发方式，而是加了一个图像增强器，其信息过程示意图如图 1：

入射光子到达光电阴极，激发出电子。电子由倍增器倍增，数量增加。倍增后的电子轰击荧光屏，激发出光子。这些出现在荧光屏上，亮度得到了增强的图像再耦合到 CCD 上，产生信号电荷电包，这就是 ICCD 的工作原理。

当用 CCD 直接取代荧光屏，以省去第二次光电—电激励，而由倍增电子产生电荷包时，便是电子轰击式 (EBS) 的 ICCD。

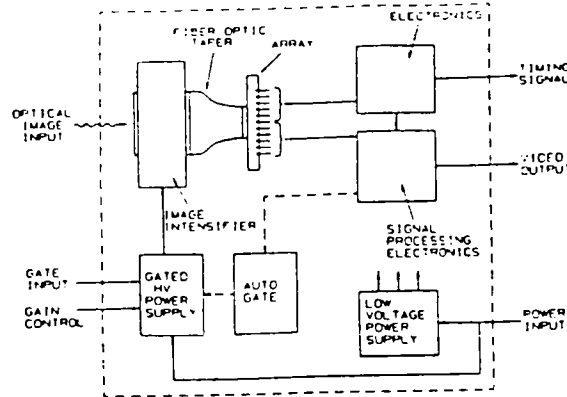


图 2 全固体摄像机功能框图

3.2 ICCD 的基本结构及应用

ICCD、即增强型 CCD，就是在入射光子和 CCD 靶面之间增加了一个图像增强器，以加大入射到 CCD 表面的光强。因此，除少量用于微光下的特殊措施外，ICCD 的基本结构就是像增强器以及将它耦合到 CCD 上的“中继”器。使用 ICCD 构成的增强型全固体摄像机的功能框图如图 2 所示：

3.2.1 像增强器

从 1958 年出现第一只静电聚焦的串联图像管至今，像增强器已经历了三十余年的发展过程。其间，出现了三代不同结构，

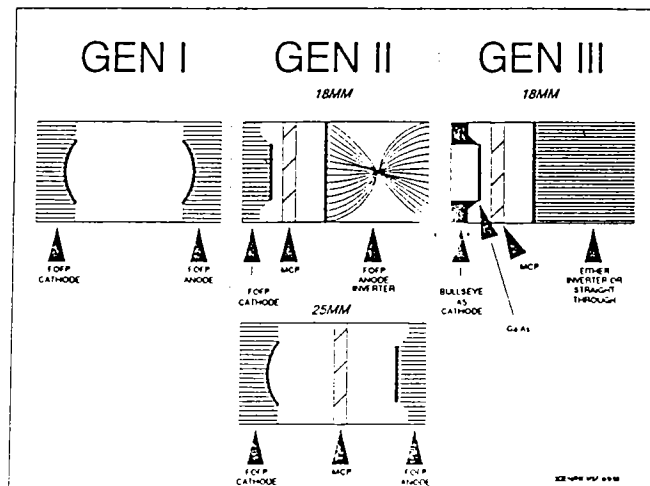


图 3 三代不同结构示意图

见图 3。

微通道板 (MCP) 技术的出现, 使器件的体积、重量、寿命等关键指标有了大幅度的提高, 从而结束了第一代像增强器的历史, 使第二代 (及其改进型、或称超二代管) 至今仍是构成 ICCD 的主流器件。耦合方式有使用光学中继透镜的倒像式和使用光纤耦合的近贴式两种。前者体积大且耦合效率低, 有被后者逐步取代的趋势。

第三代增强器以 GaAs 光电阴极的出现为标志。这一技术不但提高了光电阴极的量子效率, 而且使光谱响应更加与夜间光谱相匹配, 从而能较大幅度地提高微光条件下的灵敏度和信噪比。

几种典型的像增强器的性能如表 4^[7]

表 4 典型像增强器的性能

型号	灵敏度 $\mu\text{A}/\text{lm}$	亮度增益	光电阴极	信噪比	等效背景照度 lx
XX1410 (I 代)	450	7500-15000	S25	4.8	0.2×10^{-3}
XX1610 (超 I 代)	500	22000	S25	15.5	0.2×10^{-3}
ANVIS (II 代)	1300	20000	GaAs	18.3	0.2×10^{-3}

3.2.2 ICCD 的应用

使用第 I、超 I 和第三代像增强器并将其用光纤与 CCD 耦合起来 ICCD、由于具有体积小、重量轻、功耗低、寿命长、无畸变、无惰性、动态范围大、灵敏度高、对近红外敏感、工作电压低等一系列优点, 特别适合于装成小型微光电视摄像机, 用于微光下的监视系统和弱光下的生物成像等技术领域。

作为一种代表的典型产品, 表 5 开列了美国 ITT 电光产品部生产的微光摄像机的主要技术性能。从中可以看出使用第三代像增强器 (光电阴极 GaAs) 后, 探测灵敏度提高了一倍多。

表 5 F4577 微光摄像机的主要性能

图像探测器类型	帧转移型 MCP 增强 ICCD
成像面积	直径 $\phi 18\text{mm}$
光电阴极	S20 或 GaAs
有效像元数	754 (H) \times 488 (V)
阴极灵敏度	S20 $400\mu\text{A}/\text{lm}$ GaAs $1000\mu\text{A}/\text{lm}$
强光分辨率	400 电视行
亮度增益	S20 15, 000 GaAs 28, 000
摄像机阈值灵敏度	S20 $2 \times 10^{-7}\text{lx}$; GaAs $0.8 \times 10^{-7}\text{lx}$

值得提起注意的是,微光电视摄像机如在夜间使用,并不是全天候的,它只敏感于夜空的可见与近红外辐射。由于这种辐射能量在夜晚本来就很微弱,因此对于被动式监视与探测,视频信号的信噪比很低。相反,由于太阳落山后的宁静,背景热辐射已因大量散失而降低到一个极低数值,用热成像原理来探测目标是一种理想的工作方式。由于热辐射的波长较长,对烟雾、雨滴的绕射能力也较强,因此热成像是一种更为理想的全天候的夜间探测方式。

4 IRCCD

4.1 原理及分类

红外电荷耦合器件(IRCCD),是在硅 CCD 和红外探测器阵列技术的基础上发展起来的新一代固体焦平面技术。它的发展不但使图像传感器的工作波段从可见推广到中远红外,而且为制造成像敏感与信号处理为一体的“灵巧图像传感器”开拓了广阔的前景。

以 CCD 为基础的固体红外图像敏感器,有单片式和混合式两种结构。

单片式 IRCCD 是把红外探测器和具有扫描功能的 CCD 集成在同一衬底上。这里,CCD 的作用只是电荷包的转移和读出,而由辐射能到信号电子的转换则由红外敏感器件完成。

混合式 IRCCD 是将红外探测器阵列与完成读出功能的硅 CCD 相接。这里,CCD 起一个多路转换器的作用。

在单片式 IRCCD 中,目前硅肖特基势垒红外图像探测器(SBD)受到极大的重视。这是由于它使用的内光电发射的探测机理适于制出大面积高空间响应均匀性的器件。表 5^[8]和表 6 列举了截止到 1990 年西方几个主要厂家公布的工作在 (1-5) μm 波段的 SBD 器件 PtSi IRCCD 的情况。

表 6 PtSi IRCCD 阵列在 77°K 时的性能

像元数	256×256	488×640
像元尺寸 (μm)	30	20
响应度 (mV/K, f/2. 60Hz)	10	10
动态范围 (dB)	64	64
噪声基底 (电子数)	200	200
帧频 (Hz)	60	60
NE Δ T (°Cf/2)	0.09	0.09

在单片式 IRCCD 迅速发展,并逐渐付诸实用的同时,混合式 IRCCD 也得到迅速发展。特别是光伏型(PV)红外探测器阵列与硅 CCD 多路转换器直接注入的混合集成一直有很好的发展势头。能工作在 12 μm 以内的 HgCdTe,其线阵做到 960 元,二维面阵已做到 480、640。InSb 背照片混合集成器件阵列,也从 58×64、128×128、直做到 640、480、其峰值量子效率高于 90%。

Type of FPA	Pixel Size H x V (μm) ²	Fill Factor (%)	Type of SBDs		Year	Company	Ref.
			Silicide	Ψ_{ms} (eV)			
25 x 50 IT	160 x 80	17	Thick-PtSi	0.27	1978	Sarnoff/RADC	3, 4, 5
			Thin-PtSi		1979	Sarnoff	6, 7
256 x 1	40 x 200	50-83	Thick-PtSi	0.27	1978	Sarnoff/RADC	4
			Thin-PtSi		1979	Sarnoff/RADC	6
32 x 63 IT	160 x 80	25	PtSi	0.208-0.22	1981	Sarnoff	13
			Pd ₂ Si	0.337	1982	Sarnoff	10, 12
64 x 128 IT	133 x 80	22	PtSi	0.208-0.22	1983	Sarnoff	9, 11
32 x 64 IT	133 x 80	19	PtSi	0.277	1981	Mitsubishi	8
64 x 64 IT	130 x 70	23	PtSi	0.23	1983	Fujitsu	15
Meander-Channel							
256 x 256 IT	37 x 31	25	PtSi	0.26	1983	Mitsubishi	14
64 x 64 MOS (1T)	80 x 65	56	PtSi	0.23	1983	Mitsubishi	18
160 x 244	80 x 40	39	PtSi	0.22	1984	Sarnoff	21
512 x 2	30 x 30	70-87	Pd ₂ Si	0.375	1985	Sarnoff	22
1024 x 1	14 x 14	100	PtSi	0.23	1966	NEC	59
64 x 128 IT	130 x 65	19	PtSi	0.26	1986	Valvo	26, 36
512 x 512 CSD	26 x 20	39	PtSi	0.22	1987	Mitsubishi	23
256 x 256 Hybrid	30 x 30	85	PtSi	0.23	1987	Hughes	40
256 x 1 MOS	60 x 25	57	PtSi	0.23	1987	Reticon	25
	to 60 x 200						
128 x 128 CTD-MOS (1T)	60 x 60	42	PtSi	0.23	1987	Reticon	24
4096 x 4	10 x 10	100	PtSi	0.22	1987	Mitsubishi	27
320 x 244 IT	40 x 40	43	PtSi	0.22	1988	Sarnoff	39
512 x 512 CSD	26 x 20	39	IrSi	0.17	1988	Mitsubishi	35
324 x 487 IT	42 x 21	42	PtSi	0.23	1988	NEC	49
190 x 244 IT	60 x 36	20	PtSi	0.205	1988	Loral Fairchild	50
320 x 244 IT	40 x 40	44	PtSi	0.22	1989	Sarnoff	48
256 x 244 IT	31 x 25	36	PtSi	0.22	1989	Loral Fairchild	51
512 x 244 IT	31 x 25	36	PtSi	0.22	1989	Loral Fairchild	51
512 x 512 LACA	30 x 30	54	PtSi	0.23	1989	Reticon	55
128 x 128 IT	29 x 48	52	IrSi	0.132	1989	MIT Lincoln Lab/Ford	45
640 x 486 IT	25 x 25	54	PtSi	0.22	1990	Kodak	52
26 not interlaced							
2048 x 16-TDI	30 x 30	43	PtSi	0.22	1990	Kodak	53
256 x 256 IT-CCD	40 x 40	52	PtSi	0.22	1990	Ford	58
Meander-Channel, Al field plate not interlaced							
400 x 244 Hybrid	24 x 24	84	PtSi	0.23	1990	Hughes	54
640 x 480 MOS (2T)	24 x 24	38	PtSi	0.22	1990	Sarnoff	63
128 x 128 DSI	50 x 50	100	PtSi	0.21	1990	Sarnoff	64

4.2 应 用

IRCCD 用作热成像的固体焦平面器件, 能广泛应用于军事、医疗、工业的各个方面。目前由于价格较高, 国产器件 (如 1444 所、上海技物所等已在 PtSi 方面取得显著进展) 性能尚待稳定, 主要应用还偏重于军事方面, 如空间遥感 (成像光谱仪)、导弹制导、夜视、预警等。例如: 采用 IRCCD 的预警系统, 将有如下特点:

- 灵敏度高、分辨率高, 可大大增加作用距离和监视能力, 提高探测率;
- 能广泛运用实时图像处理技术, 以自动跟踪移动目标, 降低虚警率;
- 能收集多谱段信息, 便于识别伪目标;
- 全被动工作, 生存能力强;

·全固态化,无机械扫描装置,结构小型、紧凑、可靠性高。

作为产品推出的有仙童公司的 CAM6000 系列 PtSi、SBD、IRCCD 摄像机,其光谱响应范围为 $1-5.5\mu\text{m}$ 、 $\text{NE}\Delta T' < 0.2^\circ\text{C}$,分辨率从 244×190 到 488×512 。另外, Sarnoff 研究中心也推出了型号为 IRH32043, IRH640 的红外焦平面阵列摄像机,后者的性能如表 7。

表 7 IRH640 IRCCD 摄像机性能

· 单片式 PtSi SBD
· $\text{NE}\Delta T < 0.05\text{K}$
· 像元分辨率 $640(\text{H}) \times 480(\text{V})$
· 像元尺寸 $24 \times 24\mu\text{m}$
· 不均匀性 $< 1\%$ BMS

参 考 文 献

- [1] James Janesick, New advancements in CCD technology-sub-electron noise and 4096×4096 pixel CCDs. SPIE, 1990, 1242
- [2] R. A. Nerille, Wide-angle high-resolution line-imager prototype flight test results. Applied Optics, 1992, 31 (18)
- [3] Morley M. Blouke, Large format, high resolution image sensors. Optical Engineering, 1987, 26 (9)
- [4] Richard A. Bredthaurer, Very large area 2048 and 4096 CCD Image sensors. SPIE, 1989, 1161
- [5] K. Y. Wong, A 1536×1024 CCD image sensor. SPIE 1991, 1447
- [6] J. C. Geary, 4096×4096 pixel CCD mosaic imager for astronomical applications. SPIE, 1991, 1447
- [7] Jacques Dupuy, XX1610 The super second Generation image intensifier. SPIE, 1989, 1072
- [8] Walter F. Kosonocky, Review of schottky-barrier imager technology. SPIE, 1990, 1308

The CCD, ICCD and IRCCD as Imager

Yu Qianyang

(Changchun Institute of Optics and fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130021)

Abstract

The recent developments of CCD, ICCD and IRCCD as an imager are reviewed. The potential applications of the very low noise, low-light level and infrared-rad are pointed.

Keywords: Image sensor, CCD, ICCD, IRCCD