

微光像传感器技术的最新进展

田金生

(云南光学仪器厂, 云南 昆明 650114)

摘要: 在回顾微光像传感器的发展历程、现状和跟踪最近 10 年的发展轨迹的基础上, 提出了确定新一代微光像传感器的原则和发展方向。并重点介绍了微光像传感器的最新进展。包括, 带有前置增强级的 CCD/CMOS, 如增强 CCD/CMOS、电子轰击 CCD/COMS。固体微光 CCD/CMOS、CCD 和 CMOS 混合微光像传感器、电子倍增 CCD, 铟镓砷短波红外微光像传感器。

关键词: 微光夜视; 像增强器; 像传感器; LLLCCD/CMOS; CCD 和 CMOS 混合; EMCCD; ICCD/CMOS; EBCCD; EBAPS; InGaAs

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)09-0527-008

New Development of Low Light Level Imaging Sensor Technology

TIAN Jin-sheng

(Yunnan Optical Instrument Factory, Kunming 650114, China)

Abstract: Based on the review of the development course, status of LLL image sensor, and tracking the development path of LLL image sensor in the near 10 years, this paper proposes the determination principle of a new generation of LLL image sensor and development direction. It also focuses on the latest progress of LLL image sensor including the CCD/CMOS with pre-intensified stage, such as the ICCD/CMOS and the EBCCD/COMS, solid-state LLL CCD/CMOS image sensor, CCD/CMOS hybrid image sensor, EMCCD, and InGaAs short wave infrared image sensor.

Key words: LLL night vision, image intensifier, LLL image sensor, LLL CCD/CMOS, CCD and CMOS hybrid, EMCCD, ICCD/CMOS, EBCCD, EBAPS, InGaAs

0 前言

夜视技术是研究在夜间或微弱照度下, 光学图像信息的摄取、波段转换、增强、处理、传输、贮存、显示的技术, 是信息技术的高端领域。在人类所获得的各种信息中通过视觉系统获得的信息约占 75%~80%。由于视觉系统的局限性和缺陷, 限制了人类获得微弱、精细、高速图像信息的可能性和不可见光图像的可能性。人眼的局限性和缺陷如下:

1) 响应波长的限制: 仅对光学波段中的可见光有响应。对 X 光、紫外光、红外光没有响应。仅利用了光学波段中大约 1% 的波段资源。

2) 响应辐射能的限制: 作为图像传感器的人眼, 只有当瞳孔处的照度大于 10^{-1} lx 时才能形成可识别的图像。当照度超过 10^{+5} lx 时将产生炫目现象, 照度进一步增加时, 会造成眼的损伤, 导致失明。即人眼

的动态范围为 $10^{-1} \text{ lx} \sim 10^{+5} \text{ lx}$ 。

3) 空间分辨力的限制: 人眼网膜上视细胞具有马塞克结构, 黄斑上圆锥细胞的等效直径大约为 $5 \mu\text{m}$, 对应的极限分辨角为 $1'$ 。这个数值被称为视觉锐度。

4) 对比度(灰度)分辨力的限制: 人眼具有在一定背景中识别目标的能力。在最佳照度下 ($5 \sim 1000 \text{ cd/m}^2$), 人眼的对比度分辨力为 2%。该值被称为人眼的阈值对比度。

5) 时间分辨力的限制: 人眼在接受以时间为变量的脉冲信号或闪烁时, 具有低通滤波器的特性, 其截止频率为 $50 \sim 60 \text{ Hz}$ 。即人眼的快门速度低于 0.02 s 。

根据仿生学和人机工程学的概念, 夜视技术是研究、制造和望远镜、显微镜类似的人眼助视器“夜视镜”, 克服人眼缺陷, 突破人眼限制的技术。是将人眼看不见的光学图像进行波段转换、图像增强、处理、

显示为适合人眼观察的可见光图像的技术。

夜视技术可以分为 2 大类：

1) 微光夜视技术：在夜天光或微弱照度条件下，将人眼看不见的目标和场景的反射光形成的灰度图像转换、增强、处理、显示为适合人眼观察的可见光图像的技术。

2) 红外热像技术：将人眼看不见的目标和场景自身红外热辐射形成的温度图像转换、增强、处理、显示为适合人眼观察的可见光图像的技术。

在微光夜视技术中，图像信息流程中的第一阶段是图像获取。实现图像获取的器件为焦平面微光像传感器。它是微光技术中最核心、最关键的器件，其性能标志着夜视技术的水平和应用前景。本文在回顾微光像传感器的发展历程、现状和跟踪近 10 年发展轨迹的基础上，提出了确定新一代微光像传感器的原则和发展方向。并重点介绍了微光像传感器的最新进展。包括，带有前置增强级的 CCD/CMOS，如增强 CCD/CMOS、电子轰击 CCD/COMS，固体微光 CCD/CMOS、CCD 和 CMOS 混合微光像传感器、电子倍增 CCD，铟镓砷短波红外微光像传感器。

1 微光像传感器的发展历程

从 20 世纪 50 年代初美军夜视实验室的成立，至今已有 60 年的历史。以真空像增强器（Image Intensifier, II）为主线的微光像传感器（Low Light Level Image Sensor, LLLIS、L3IS）经历了从“零代”、“一代”、“二代”、“三代”、“四代”到“无代”几个发展阶段（见图 1）。每一代都有自己独特的特征技术。

“零代”：出现于 20 世纪 40 年代，由于需要红外光源照明被称为主动微光夜视技术。其特征技术为银-氧-铯光阴极，单级二电极像管技术。

“一代”：出现于 20 世纪 60 年代初，是第 1 个不需人工照明，仅用夜天光即可实现微光观察的被动微光夜视技术。其特征技术为多碱光阴极，带光纤面

板输入、输出窗的静电聚焦倒像式像管和这些像管的耦合技术。

“二代”：出现于 20 世纪 60 年代中，其特征技术为具有多碱光阴极、微通道板的像管技术。包括，倒像式微通道板像管和近贴式微通道板像管。实现了微光产品的小型化和实用化。

“三代”：出现于 20 世纪 70 年代末，其特征技术为具有 III-V 族负电子亲和势光阴极，带防离子反馈膜微通道板的近贴聚焦像管技术。

“四代”：出现于 2000 年，其特征技术为具有 III-V 族负电子亲和势光阴极、无防离子反馈膜微通道板的近贴聚焦像管技术，亦称带无膜微通道板的三代。在研发四代技术时发现，如将三代的防离子反馈膜进一步减薄比全部去除更为合适，它不仅有四代管的高性能，还保持了三代管的长寿命，被称为顶级三代（Gen. 3 Pinnacle）。

“无代”：三代像管的阴极灵敏度比二代提高了 3~4 倍，但信噪比和视距并没有相应的提高。为了提高三代管的性能，1985 年美国启动了“Omnibus”计划对三代进行改进和升级；理论分析二代阴极灵敏度可以达到 $900 \mu\text{A}/\text{lm}^{[1]}$ ，加上无膜 MCP 在噪声系数方面的优势，欧洲各国扬长避短采用二代升级的技术路线，研发超二代像管和美国的三代管竞争。三代 Omnibus 计划的每个发展阶段，都有性能、质量相当的超二代像管与其对应（详见图 1 和表 1）。为此，评价像增强器的等级和质量的标准不应是“代”，应由其性能指标和场景的观察效果来确定。从而，像增强器进入了“无代”阶段。在输入信号较微弱时，像增强器的性能主要由信噪比决定，在输入信号较强时，主要由分辨力确定。2002 年美国的相关部门提出了评价像管性能的综合指标“品质因数”。

品质因数 = 信噪比 × 分辨力

对于品质因数 > 1600 为最高等级，仅装备美国海陆空三军和特种部队；

$1600 \geq \text{品质因数} > 1250$ 可向北约盟国和与美国

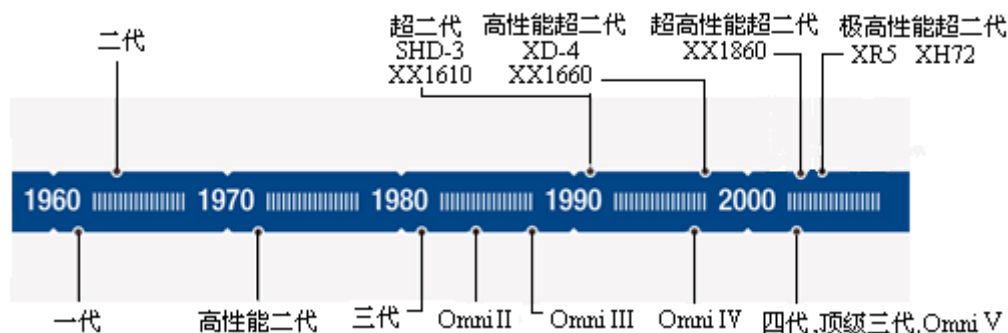


图1 微光像增强器研发时间表

Fig.1 development timetable of LLL image intensifier

表 1 超二代和相应的三代、四代性能比较 Table 1 Super 2nd, 3rd and 4th generation performance comparison

参数	二代	高性能二代 XX1410	超二代 SHD-3 XX1610	高性能超二代 XD-4 XX1660	超高性能超二代 XX1860	极高性能超二代 XR5, XH72
		三代 Omni I	高性能三代 Omni II	超三代 Omni III	高性能超三代 Omni IV	顶级三代, 四代 Omni V
分辨率	32	36	45	57	64/72	64/72
信噪比	14	15.5	18	21	23	25
品质因数	448	556	810	1197	1472/1656	1600/1800
改善系数	1	1.4	1.6	1.8	2.1	2.53

注：1.表中的数据均为最小值

2.试验条件：(1) 天候：有云、星光 ($1 \times 10^{-4} \text{lx}$)；(2) 夜视仪：AN/PVS-7 夜视眼镜；

(3) 目标：对比度为 30%，车辆大小的靶

关系极好的 7 个国家出口；

品质因数 ≤ 1250 可向一般国家出口，但受美国制裁国家例外。

从 20 世纪 50 年代初开始一代像管研制，到 70 年代末三代像管投产大约用了 25 年。而三代到四代却花费了近 20 年。四代像管本身也是一个先天不足的早产儿，准确地说应称为带无膜 MCP 的三代像管。2000 年后，以像增强器为主线的微光夜视技术，在理论上未出现重大的突破，在技术上未出现重大的创新，在光敏面的材料上未出现重大的发现，处于缓步不前的状态。和日新月异高速发展的固体像传感器相比，如昔日黄花，几乎被高速发展的信息技术冷落。曾显赫一时的著名公司都相继关闭或转让了像增强器生产线，或转产固体像传感器。经改组和合并，只剩下了屈指可数的四五个知名公司。70 年代出现的以 CCD 像传感器和 90 年代以有源 CMOS 为代表的固体像传感器独树一帜和真空-固体混合像传感器给微光夜视技术带来了新鲜血液，出现了新一代微光夜视技术。如增强 CCD/CMOS(ICCD/CMOS)、电子轰击 CCD/CMOS (EBCCD/CMOS)，全固体的电子倍增 CCD (EMCCD)、微光 CCD/CMOS (L3CCD/CMOS)、CCD 和 CMOS 混合微光像传感器、铟镓砷 (InGaAs) 短波红外 (SWIR) 微光像传感器。从此微光夜视技术步入了以固体像传感器为主导的快车道。

2 确定新一代微光夜视技术的原则

像增强器并不是微光像传感器的全部，仅是微光像传感器的一种。在确定新一代微光夜视技术时，应站在信息技术的高度，应根据微光夜视技术的定义、范围和内涵来思考微光夜视技术的发展和未来。新一代微光夜视技术应符合下述基本原则。

2.1 与夜天光辐射相匹配

微光夜视系统是利用夜天光在目标上的反射光进行工作的。充分利用夜天光资源，提高像传感器光敏面的光谱响应，以及与夜天光的匹配率，一直是微光夜视技术发展的原动力和奋斗目标。如图 2^[2]所示，夜天光辐射覆盖了可见光、近红外和短波红外波段。其峰值和主要辐射能均在短波红外波段，该波段的辐射能是可见和近红外波段之和的数十倍。如图 3^[3]、图 4^[4]可知，三代镓砷光阴极的光谱响应与夜空辐射的匹配率大约是二代多碱光阴极光谱响应与夜空辐射光谱匹配率的 3 倍。InGaAs 短波红外像传感器的光谱响应与夜空辐射的匹配率大约是三代镓砷光阴极的 10 倍，大约是二代多碱光阴极的 30 倍。

2.2 与人视觉系统相容

夜视系统是人眼的助视装置，整个成像系统的最终环节是人的视觉系统。由人的大脑做出最终的识别和看清的判断。因此夜视系统输出的图像应该满足视觉系统的要求，符合视觉系统的习惯，与视觉系统相容。人眼看到的图像是由目标反射自然光或其他光源的光形成的像。这个像是由等亮度线形成的反映目标

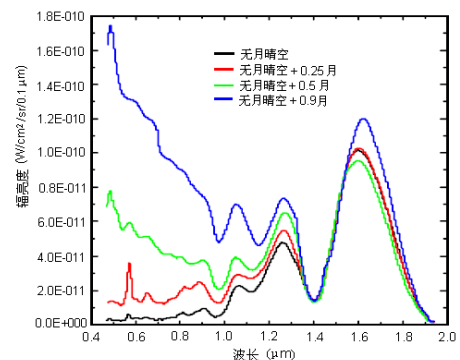


图 2 夜天光光谱辐射曲线

Fig.2 Spectrum radiation curves of night sky

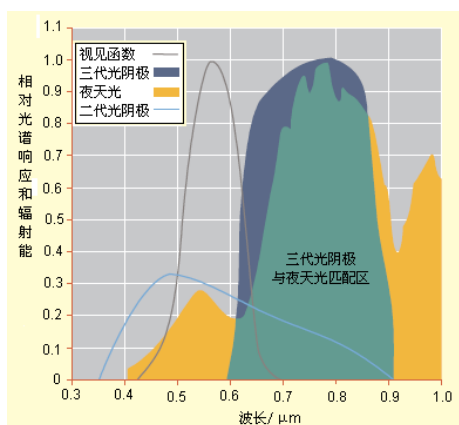


图3 二代、三代光阴极光谱响应与夜空辐射匹配率
Fig.3 Spectral response matching rate of 2nd and 3rd gen. photocathode with night sky radiation

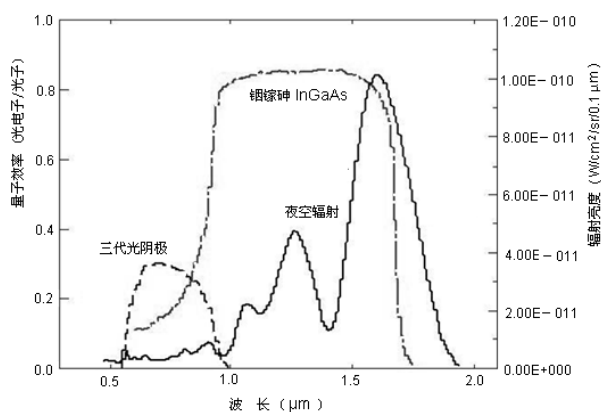


图4 三代光阴极和铟镓砷光谱响应与夜空辐射匹配率
Fig.4 Spectral response matching rate of 3rd gen. photocathode and InGaAs with night sky radiation

亮度分布的灰度图像，分辨和识别的是不同对比度的图像。

微光夜视系统输出的图像是利用物体反射夜天光形成的灰度像与人眼视觉系统相容。而红外热像系统输出的图像是利用目标自身热辐射形成的像是由等温度曲线形成的，反映目标温度分布的图像。这个图像不符合人视觉系统习惯，不容易做出正确的识别和判断。对于图5所示的图像，即使经过培训和强化训练的观察者来说，误读、误判率也是很高的。特别是长波红外热图像受环境的温度和目标的状态影响



图5 用不同波段光拍摄的像之比较

较大，这个图像随时随地都在变化，给图像的识别和辨认带来了更大的困难。为此美国的法律规定，长波红外热像仪拍摄的图像资料，不能作为定案的物证。

2.3 固体、焦平面凝视、数字化器件

在20世纪80年代前，像传感器特别是像增强器和电视摄像器件几乎是真空器件的一统天下。这是因为真空器件有它的优势：

光敏面的制作工艺简单，容易制作直径为18、25、40 mm大面积的光敏面，X光像增强器的光敏面可达300~400 mm。这对固体器件是不可想象的。

在性能上，真空器件的暗电流噪声和响应速度均优于固体器件。例如，二代多碱光阴极暗电流的典型值为 10^{-15} A/cm²。三代砷化镓光阴极的暗电流的典型值为 10^{-13} A/cm²。而CCD的暗电流大于 10^{-12} A/cm²，CMOS的暗电流比CCD的暗电流还要大一个数量级。真空器件的响应速度可达 10^{-15} ~ 10^{-17} s，这个响应速度对固体器件来说，是可望不可及的。80年代美国阿波罗登月舱中，微光电视使用的SIT硅增强靶摄像管就是真空光电成像器件。

真空器件的致命缺陷是强光容易引起损坏，机械强度和适应性极差，寿命短、可靠性差。且体积、重量大，功耗大。这是它被商业市场特别是军事应用逐渐淡化的主要原因。

固体光电成像器件的优势是：

体积小、重量轻、耗电少、环境适应性好、可靠性高。与高速发展的信息技术相容。利用数字技术可以对图像信号在像素中进行时间积累、像素的空间组合、数字降噪、扩展动态范围，可以使器件的信噪比大幅度地提高。经40年的研发和生产，除了暗电流和响应速度外，其他性能均已赶上或超过真空器件。

2.4 集成化的小模块，智能化、多功能的大平台

新一代微光像传感器应该是集成度极高的多功能、智能化模块。这个模块包括，具有光电转换、电荷传输、模-数转换、信号处理、视频读出等功能的芯片相机，具有测距、通讯、定位等功能的组件和电源电路。这个模块是一个具有观察、监视、瞄准、测距、定位、通信、记录、存储、图像处理等功能的智能平

Fig.5 Comparison of different bands Image

台。

3 微光像传感器的最新进展

3.1 前言

1970 年初美国贝尔实验室提出了电荷耦合器件 (CCD) 的新概念。1971 年贝尔实验室、RCA 公司和仙童公司相继制成了试验器件。1973 年进入了商业市场。1975 年仙童公司研制成功了能在 1/4 月光下正常工作的埋道 CCD。这个具有光电转换、电荷传输功能的全固体自扫描像传感器的研制成功,像一声春雷引起了科技界、企业家和军方的巨大反响。它标志着真空像传感器为主导的时代即将结束,固体像传感器为主导的新纪元即将到来。由于硅材料的光谱响应、与夜天光的匹配率、量子效率均高于三代 GaAs 光阴极,因而有人提出 CCD 就是第四代微光像传感器。并预言其发展前景和发展速度将超过三代像增强器。经 40 多年的努力,研制成功了适合于夜天光条件下工作的背照 CCD (BI-CCD, BCCD)。

早在 1960 年就研制成功了 CMOS 像传感器。由于灵敏度低、噪声大、均匀性差等原因未引起科技界、企业家和军方的重视,几乎被人遗忘。直至 1990 年美国宇航局 (NASA) 发明了有源像素结构 CMOS 像传感器 (Active Pixel Sensor APS), CMOS 像传感器 (CIS) 步入了高速发展的快车道,成为像传感器市场的主流产品。APS 成功的解决了 CMOS 量子效率低、噪声大的困扰,获得了高速的发展。目前已占据固体像传感器的半壁江山。在手机、计算机、网络、扫描仪、传真机、数码相机中几乎全部使用 APS,逐步取代了 CCD。美国仙童公司生产的科研级 CMOS (sCOMS) 在性能上已超过行间传输 CCD,接近 EMCCD。2009 年仙童公司生产的微光 CMOS 像传感器 (L3CIS) 已用于与非致冷长波红外热像传感器构成的数字融合夜视系统。

2000 年 10 月美国传感器公司推出了 InGaAs 光电二极管阵列结构的短波红外 (SWIR) 焦平面阵列 (FPA) 微光像传感器。由于 InGaAs 的光谱响应与夜天光的匹配率比现在广泛使用的 Si 提高了近一个数量级,是目前最理想的微光像传感器。并立即引起了美国国防高科技研究计划局 (DARPA) 和军方的关注。经 10 多年的努力,已推出重量仅有 10 g 的微型像传感器智能模块。

3.2 带前置增强级的微光像传感器

普通的 CCD 和 CMOS 固体像传感器由于暗噪声和读出噪声的限制,不能在低于 0.2 lx 的环境中正常

工作。为了实现夜天光和低照度条件下正常工作,最经典、最有效的方法是增加前置增强级^[5]。常用的增强级为暗电流低、响应速度快、增益高的像增强器。构成真空和固体组合的微光像传感器模块。如 ICCD/CMOS 和 EBCCD、EBAPS。

3.2.1 增强 CCD/CMOS 像传感器

ICCD/CMOS 由前置增强级、中继光学元件、CCD/CMOS 像传感器 3 个独立部分组成。前置增强级为像增强器,使用光纤元件作为中继光学元件的被称为光纤耦合 ICCD/CMOS (见图 6),使用光学透镜作为中继光学元件的被称为透镜耦合 ICCD/CMOS (见图 7)。ICCD 是出现最早、工艺最成熟、增益最高、读出噪声最小、选通速度最高、使用最广泛的微光像传感器。如图 8 所示,当像增强器增益较高时,ICCD 的读出噪声可以小于 1 个电子,可以用于光子计数。中继光学元件的功能是将像增强器荧光屏上的图像传递到 CCD/CMOS 的光敏面上。评价中继系统性能的 2 个最主要的指标是耦合损失 (漫射透过率) 和传像质量 (MTF、分辨率)。

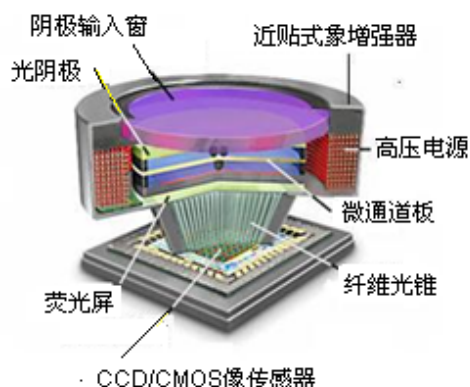


图 6 光纤耦合 ICCD/CMOS 像传感器
Fig.6 ICCD/CMOS coupled by fiber optic

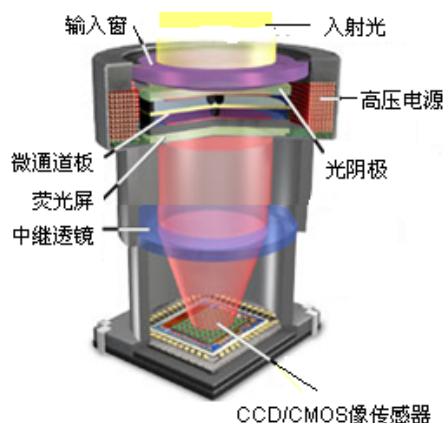


图 7 透镜耦合 ICCD/CMOS 像传感器
Fig.7 ICCD/CMOS coupled by lens

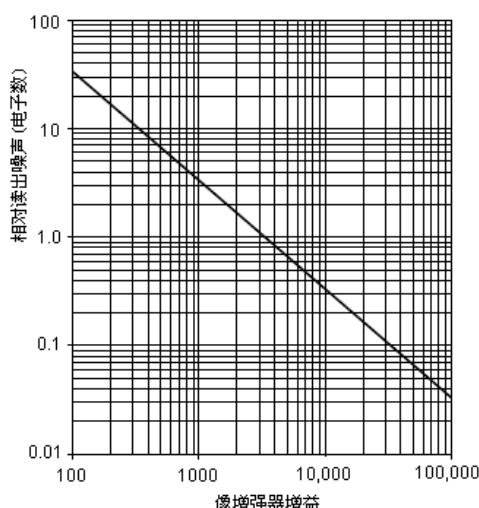


图8 ICCD 像传感器的读出噪声

Fig.8 Readout noise of ICCD imaging sensor

1) 光纤耦合 ICCD/CMOS

光纤耦合结构有 3 种类型。

①早期(1980 年前后)采用图 9(a)所示的,带直光纤输出窗的像增强器+纤维光锥+带光纤面板输入窗 CCD 耦合结构。该结构包括 3 个光纤元件,3 个耦合面。耦合效率低(见图 10)、杂光大,像质和分辨力损失较大,纤维结构缺陷、畸变和固定图案噪声明显,体积重量较大。但耦合技术简单、工艺风险小,合格率高。

②中期(1990 年前后)采用图 9(b)所示的,带直光纤输出窗的像增强器+光锥输入窗 CCD 耦合结构。该结构包括 2 个光纤元件、2 个耦合面。耦合效率、杂光中等,像质和分辨力损失适中,纤维结构缺陷、畸变和固定图案噪声明显,体积重量较大。耦合技术简单、工艺风险小,合格率高。

③近期(2005 年后)采用图 9(c)所示的,带光锥输出窗像增强器+无窗 CCD/CMOS 耦合结构。该结构包括 1 个光纤元件、1 个耦合面。耦合效率高、杂光小,像质和分辨力损失较小、纤维结构缺陷、畸变和固定图案噪声不明显,体积重量较小。耦合技术要求较高、工艺风险大,合格率低。如使用类似混合电

路的表面贴装设备(SMT)可以将工艺风险降到最低,合格率和耦合质量将有极大改善。

由图 10 可知,每增加一个耦合面,透过率将降低 30%^[6]。这是一个相当大的损失。

2) 透镜耦合增强 CCD/CMOS

透镜耦合就是在像增强器和 CCD/CMOS 中间加一组中继透镜,将荧光屏上的像高质量(零畸变、高分辨力、最小的光损失)的传送到像传感器的光敏面上。中继透镜既应有制版镜头的高像质,又应有强光力镜头的 T 数。常用的中继透镜有 3 种类型,微距镜头(Macro Lens)、制版镜头(Copy Lens)和 2 组对称配置的大相对孔径镜头。图 11 示出了美国斯坦福计算机光学公司研发的用于带微透镜阵列像传感器使用的远心系统中继透镜^[7]。这个中继透镜由 6 个透镜组成,相对孔径为 $f/0.8$,耦合效率高达 23%,零畸变,像质和传递函数极好(见图 12),极限分辨力为 180 lp/mm。

3) 光纤耦合与透镜耦合比较

光纤耦合的优点:①耦合效率比透镜耦合高 3~10 倍;②结构紧凑、体积小(见图 13)。

光纤耦合的缺点:①光纤和 MCP 本身的纤维结构,剪切畸变、曲线畸变和固定图案噪声影响成像质量;②光纤刚性连接,耦合工艺难度大、成本高。致冷困难;③像增强器的高电压、电磁干扰对像传感器和相机有一定影响;

透镜耦合的优点:①分辨力和 MTF 高、零畸变、像质好;②像增强器、中继透镜和像传感器柔性连接,可拆卸,两者可分别使用。维护更换容易(见图 14);③CCD/CMOS 相机与像增强器在空间上相互分开,像增强器的高电压和电磁干扰对相机的影响较小。致冷容易。

透镜耦合的缺点:①耦合效率较低;②体积较大;③斜光束损失较大,像面渐晕较大。

光纤耦合 ICCD/CMOS 主要应用于对成像质量和清晰度要求不高,对体积、重量和结构的紧凑性要求较高的,军用、准军用便携式微光观察、监视领域。

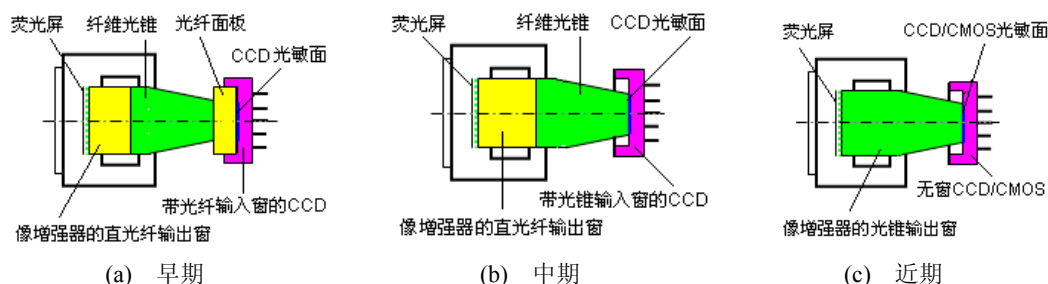


图9 不同时期光纤耦合 ICCD 的结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of fiber coupled ICCD in different periods

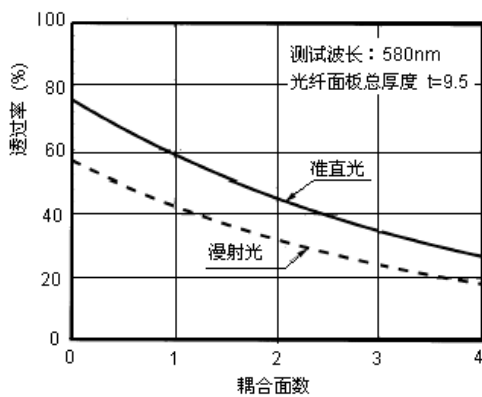


图 10 耦合面的透过率损失

Fig.10 Transmittance loss to coupled

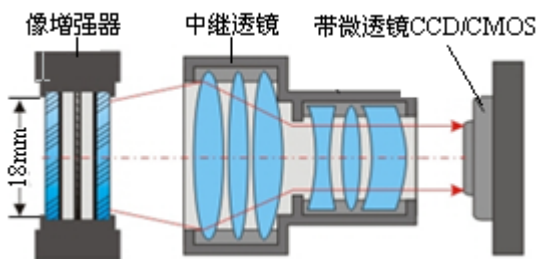
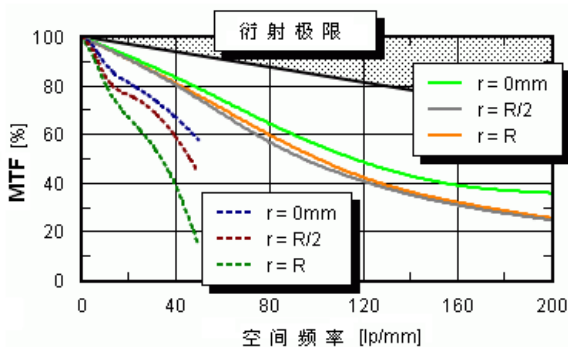


图 11 透镜耦合 ICCD 的远心系统中继透镜

Fig.11 Telecentric system relay lens used ICCD



实线为中继透镜的 MTF，虚线为商业非球面镜头的 MTF

图 12 斯坦福公司中继透镜的调制传递函数曲线

Fig.12 MTF curves of Stanford relay lens



图 13 光锥耦合 ICCD/CMOS

Fig.13 ICCD/CMOS coupled by fiber optic taper



图 14 透镜耦合 ICCD/CMOS

Fig.14 ICCD/CMOS coupled by lens

透镜耦合主要用于对成像质量和清晰度要求较高，对体积、重量和结构的紧凑性要求不高的，科研、医学成像、媒体领域。

3.2.2 电子轰击 CCD/CMOS 像传感器

EBCCD/CMOS 的技术方案来自硅增强靶摄像管。如图 15 所示，如用 BI-CCD/CMOS 取代像增强器中的荧光屏，便构成 EBCCD/CMOS。

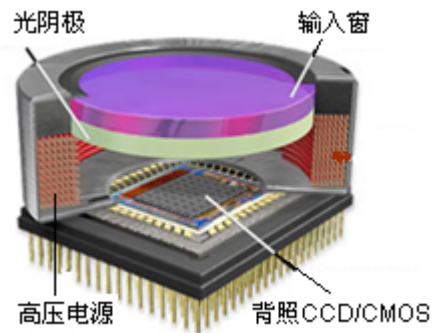
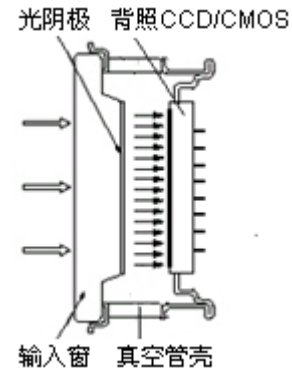


图 15 电子轰击 CCD/CMOS 结构原理图

Fig.15 Schematic diagram of EBCCD/CMOS

EBCCD/CMOS 的工作原理：光阴极将输入光子转换成光电子，在静电电压的加速下，光电子轰击 BI-CCD/CMOS，产生电子-空穴对和电子轰击半导体 (EBS) 增益。和 ICCD 比，EBCCD 取消了 MCP、荧光屏和光纤输出窗 3 个元件，仅有光阴极和 CCD 两个元件，图像的传输链短，且 EBS 增益产生的噪声远低于 MCP 的电子倍增噪声。即减小了体积和重量，又极大的提高了信噪比和 MTF。

20 世纪末美国 Scientific Imaging Technologies (SIT) 公司和 Intevac EO Sensor 公司共同研制成功了 GaAs 光阴极的 EBCCD 像传感器^[8] (见图 16)。这个 EBCCD 使用 SIT 公司的 2/3 英寸, 512×512 像素 SI502 背照 CCD。装架、光阴极制作在 Intevac 公司完成。2005 年 Intevac 公司又研制成功了使用 BI-APS 的电子轰击 APS (EBAPS)^[9] (见图 17)。该器件在 2005 年第五届士兵技术年会上，经士兵现代化项目专家组评审为“创新产品奖”。并将这个器件与高低压电源、数字信号处理器集成于被称为数字像增强器 (Digital Image Intensifier DII 或 DI2) 的 E3010M 模块^[10]中 (见

图 18)。该模块结构紧凑、体积小、重量轻 (57 g)、功耗低 (550 mW)。广泛用于小型无人驾驶飞行器系统、头部/头盔安装显示器 (HMD)，枪用瞄准镜和小型电子-光学/红外监视稳定平台。

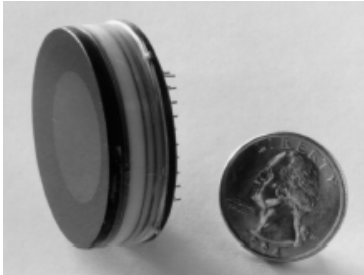


图 16 SIT 和 Intevac 研制的 EBCCD 的照片图
Fig.16 EBCCD developed by SIT and Intevac



图 17 Intevac 研发的 EBAPS
Fig.17 EBAPS developed by Intevac

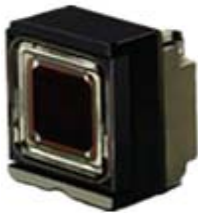


图 18 E3010M EBAPS 模块
Fig.18 E3010M EBAPS module

和 EBCCD 比较，EBAPS 的优势是很明显的，它体积小、重量轻、功耗小、价格低可靠性高。现在使用和军方采购的电子轰击像传感器绝大部分为 EBAPS，不是 EBCCD。

Intevac 生产的，被称为新一代数字 EBAPS 微光夜视装置具有如下特点：

1) 昼夜兼容，全天候工作，动态范围极宽。白天使用时 EBAPS 不加高压，APS 接收光子，光阴极只相当于带通滤光片。光谱响应为 800~1050 nm，晚上工作时，EBAPS 加高压，光阴极接受光子，发射光电子，光电子轰击 APS，光谱响应为 400~880 nm。详见图 19 和图 20。

2) 体积小、重量轻：E3010 模块重 57 g (ICCD 大于 150 g)，尺寸为 30.5H×25.4W×36.6D (ICCD 为φ37×30)。

3) APS 的帧幅为 18 mm，像素尺寸：10.8 μm，

像素数：1260×1024 (SXGA)。

4) 分辨力：46 lp/mm (1280 TVL)。

5) 功耗：<500 mW。

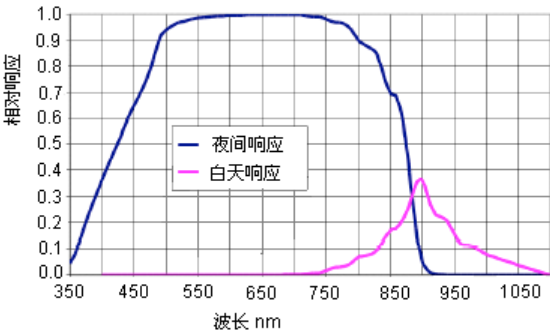


图 19 GaAs EBAPS 像传感器的光谱响应

Fig.19 The spectral response of GaAs EBAPS



EBAPS白天工作模式照片 EBAPS夜间工作模式照片

图 20 EBAPS 全天候工作照片

Fig.20 Photo of EBAPS on day and night

3.3 固体微光 CCD/CMOS 像传感器

3.3.1 微光 CCD 像传感器

微光 CCD (LLLCCD/L3CCD) 是镀制宽带减反膜的 BI-CCD。如表 2 和图 21 所示，和传统的前照 CCD (FI-CCD) 比，它有极高的量子效率。为了消除 BI-CCD 像面干涉条纹对成像质量的影响，为了提高与夜天光辐射的匹配率，将量子效率曲线的峰值向近红外方向移动，近期又研制成功了高阻硅基底的深耗尽层背照 CCD (见图 22)。

为了提高信号光电子，降低噪声 (包括暗噪声和读出噪声) 提高信噪比，L3CCD 采用了如下改进措施：

1) 提高输入信号光电子数

①提高量子效率

前照：40%~45%，前照+微透镜：75%，背照：

表 2 光阴极和 CCD 量子效率比较

光敏面	光阴极			CCD		
	多碱		GaAs 三代	前照		背照
	二代	超二代		普通前照	微透镜前照	
	量子效率/%	量子效率/%	量子效率/%	量子效率/%	量子效率/%	量子效率/%
	25	30	35	45	75	95

80%~95%。

②增大像素面积（空间积累）

选择 10~20 μm 大像素，在极微弱光条件下，将几个相邻像素组合（Binning）为超大像素（见图 23）。

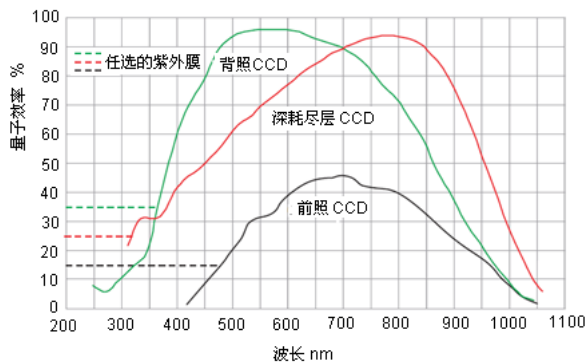


图 21 不同结构 CCD 的量子效率曲线

Fig.21 Quantum efficiency curves of different CCD

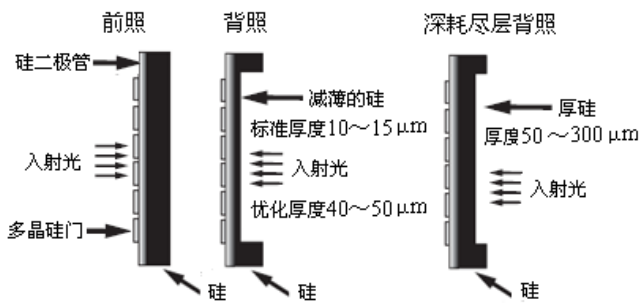


图 22 背减薄 CCD 结构示意图

Fig.22 Diagram of Back thinning CCD

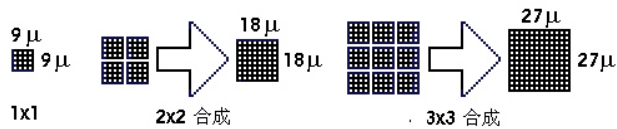


图 23 CCD 的像素组合

Fig.23 Pixel binning on CCD

③增加光积累时间（曝光时间）。在捕捉运动目标时可以采用时间延时积分（Time Delay Integration TDI）模式消除拖尾现象。

2) 降低像传感器噪声

①低温致冷；

②使用多针相（Multi-pinned-phase MPP）模式来降低暗电流；

③适当降低像素数和帧频，减少读出电路带宽。使用多路输出（见图 24），串行读出改为并行读出等方法降低读出速度。

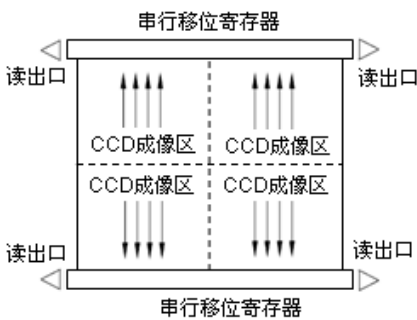


图 24 多路读出结构 CCD 示意图

Fig.24 Multi-readout architecture of CCD

3.3.2 电子倍增 CCD（EMCCD）

由于读出噪声的限制，L3CCD 不能在极低照度下正常工作。还需用增强信号电子数的方法降低读出噪声。2000 年马可尼应用技术公司下属的英国电子管公司（EEV，现名为 E2V）研制成功了电子倍增 CCD（Electron Multiplying CCD，EMCCD）^[1]。如图 25 所示，EMCCD 和 ICCD 不同，它不是使用前置像增强器来增强输入光信号，而是在帧传输 CCD（FTCCD）的移位寄存器和读出放大器之间增加了一段施加近百伏电压，具有二次电子倍增功能的倍增移位寄存器。信号电荷在倍增寄存器中经雪崩电子倍增后，再进入读出放大器，将信号电荷转换为输出信号电压。EMCCD 是在芯片上倍增的，不需要像增强器就实现单个光子探测的全固体微光像传感器。该器件还采用了能降低暗电流和暗电流散粒噪声的倒相工作制式（MPP）。EMCCD 有前照和背照帧传输 2 种规格，背照帧传输 CCD（BI-FTCCD）比前照帧传输 CCD（FI-FTCCD）的信噪比至少高 3 dB。

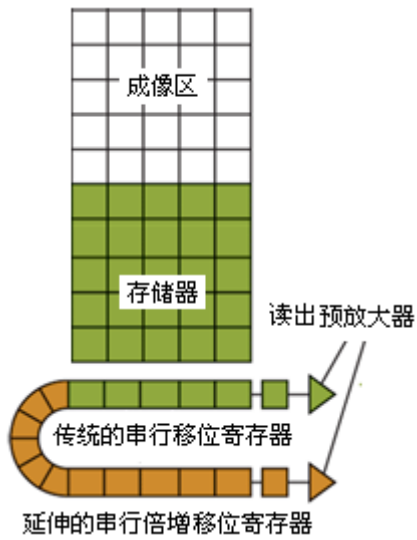


图 25 EMCCD 的结构原理图

Fig.25 Schematic diagram of EMCCD

和现有的微光传感器比较，其优点如下：

1) 高分辨率、高信噪比、极宽的动态范围

昼夜合一，全天候工作（从白天的 10^{-5}lx ~夜间的 10^{-4}lx ）。白天工作时的像质和优质 CCD 相同，夜间工作时的像质超过了高性能三代 OmniIV 像增强器构成的 ICCD。没有光纤元件带来的固定图案噪声和畸变，没有强点光源引起的光晕（Halo），能看见相邻像素的细节。（见图 26）

2) 全固体器件环境适应性好

不需要高压，可以在高低温和复杂环境中正常工作，也可以在水下工作。

3) 抗强光能力强，工作寿命长

没有光阴极，在强光、强闪光、明亮火光照射时不会损坏。期望寿命为 30000 h，寿命期内性能基本不变。

4) 结构紧凑、体积小、重量轻，容易致冷。



ICCD

图 26 ICCD 和 EMCCD 成像质量比较

其缺点如下：

1) 功耗较大，10~15 W。

2) 没有电子快门，需使用自动光圈镜头。不能实现选通工作模式。

2008 年英国 E2V 公司推出了极高灵敏度 L3C216 EMCCD 视频相机^[12]。该相机是单色、帧幅为 2/3"（像素尺寸 $11.5 \times 23 \mu\text{m}$ ，像素数 768×576 ）。它能在白天明亮的阳光下到夜晚无月有云星光条件下，昼夜 24 h 以电视帧频正常工作。数字化结构和集成的数字信号处理电路可以在极微光时，减少帧频，增加积累时间，提高信噪比。任选的空间、时间滤波器和 Peltier 热电致冷器可以在极微光时获得最佳性能。模块化的结构小巧、柔性、容易使用。广泛用于空中、地面监视：水下成像；车辆、舰船夜间驾驶；装甲车辆用车长、炮长夜视仪；科学成像；战场环境观察和评估。



EMCCD

Fig.26 Comparison image of ICCD and EMCCD

3.3.3 微光 CMOS 像传感器

微光 CMOS（LLCMOS，L3CMOS）像传感器是 CMOS 像传感器的高端产品。是具有高量子效率、高信噪比、低噪声、高动态范围、高读出速度、高分辨力，在微光条件下具有良好性能的 CMOS 像传感器。其性能已接近 EMCCD。

为了实现微光观察，开发和应用了如下新技术：

1) 背照 CMOS（BI-CMOS）技术

CMOS 像传感器的每个像素中包括有数个晶体管（通常为 5 个，最多近 20 个），加上金属布线对入射光的屏蔽作用，传统的前照 CMOS（FI-CMOS）的有效光敏面一般不超过 50%，量子效率低于 40%。参考 BI-CCD 的思路，开发了带有微透镜和减反膜的 BI-CMOS。其量子效率达 90%。适度增加耗尽层的厚度后，可见光长波部分和近红外部分的光谱响应也有了明显提高。图 27 为 e2V 公司研发的 BI-CMOS 的量子效率曲线。根据 Sony 公司发表的数据，BI-CMOS 与

FI-CMOS 比，灵敏度提高了 2 倍，信噪比提高了 6 dB。

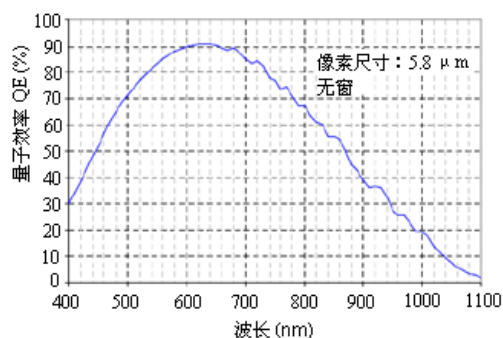


图 27 e2V 公司 BI-CMOS 的量子效率曲线

Fig.27 Quantum efficiency curve of e2V BI-CMOS

2) 数字像素技术

如将数-模转换器集成在 CMOS 的每一个像素内，在每个像素内进行数-模转换，从每个像素输出数字信号。这样的 CMOS 被称为数字像素传感器^[13]（Digital Pixel Sensor, DPS）。DPS 的优点是高速数字

读出, 无列读出噪声和固定图案噪声。因而, 像质好、读出速度更快、功耗更低。

3) 低噪声、高像质 CMOS 技术

CMOS 的暗电流比 CCD 的暗电流大 1~2 个数量级。必须采取措施优化设计, 例如采用低压驱动埋道 CMOS 技术, 其成像质量, 几乎与 CCD 相同; 又例如具有降低输出信号噪声功能的点顺序读出系统和抑制暗电流, 消除噪声的“HAD”结构。

2009 年美国仙童公司研制成功了数字融合夜视系统用的 L3CMOS 像传感器^[14]。这个 L3CMOS 的像素尺寸为 $6.5\mu\text{m}$, 像素数为 320×240 , 峰值量子效率 $>50\%$ (600nm), 室温时读出噪声 $<1\text{e}^-$ 、暗电流 $<3.8\text{pA}/\text{cm}^2$ 、动态范围 $>90\text{dB}$ ($30000:1$), 在空间频率为 $77\text{lp}/\text{mm}$ 时 $\text{MTF}=0.4$, 不同照度下的分辨力见图 28。虽然在低于 10^{-4}lx 的极低照度下, 它的灵敏度低于三代管构成的 ICCD, 但该器件的像质好、结构紧凑、体积小重量轻, 特别是红外通道的像传感器有极高的灵敏度足以补偿这个缺陷。

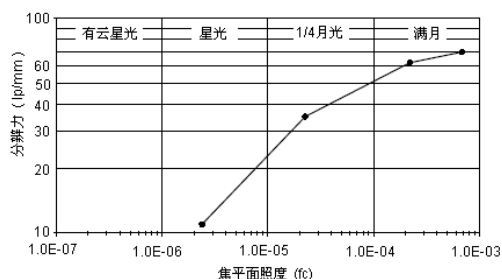


图 28 L3CMOS 在不同照度下的分辨力

Fig.28 Curve of resolution vs. illumination of L3CMOS

3.3.4 CCD/CMOS 混合微光像传感器

CCD 和 CMOS 都是在单晶硅基底上制造的, 以 MOS 电容器为基本单元的动态随机存储器阵列。所用的材料均为金属铝、氧化硅、多晶硅和单晶硅。工艺和设备也类同。两者的差别是设计的结构不同, 读出的方法不同, 因而导致不同的制作工艺和性能。各有优缺点, 而且这些优缺点是互补的。

1) CCD 的优缺点

对于成像应用来说, CCD 的结构和工艺是非常理想的。有较大的开口比, 背照器件镀宽带减反膜后有接近 98% 的量子效率, 极低的暗电流 (室温下 $3\sim 10\text{pA}/\text{cm}^2$), 良好的线性, 电荷传输损失几乎为 0, 像的均匀性极好。可以用像素组合和时间积累的方法提高信噪比。CCD 灵敏度高、像质好、清晰度高被认为是理想像传感器。

在电荷传输过程中, 需要使用时钟信号和时钟驱动器, 其驱动电压为 $5\sim 10\text{V}$, 功耗高达数瓦。串行读出的读出速度低, 读出噪声与读出速度和读出放大

器的带宽成正比, 较大的读出噪声限制了它在微光条件下的应用。CCD 结构和工艺较复杂, 在一个芯片上不能实现 CCD 的全部功能。时钟驱动电路、模数转换电路等需要在其他芯片 (至少 3 片) 或印刷电路板上完成。因而 CCD 相机结构复杂、体积大、多个电源功耗大, 可靠性差。

2) CMOS 的优缺点

CMOS 的灵敏度、成像质量、暗噪声比不上 CCD, 但 CMOS 的读出速度快, 很容易实现百万像素/秒的读出速度。最高为 1G 像素/s。读出噪声也极低。

CMOS 使用标准的半导体集成电路工艺, 工艺成熟, 集成度高。可以在 1 个芯片上集成相机的全部电路, 包括像素光电二极管、读出放大器、模数转换器、数字存储器、驱动控制器、数字信号处理器等。因而 CMOS 像传感器芯片, 不只是一个像传感器, 而是一个相机系统, 被称为芯片上的相机。

CMOS 结构紧凑, 体积小、重量轻、成本低、可靠性高。CMOS 输出电压低, 一般只有 1 个公用电源, 功耗极低 (毫瓦数量级), 低于 CCD 相机的 1/10。

无论是 L3CCD 还是 L3CMOS, 目前都不能在低于 10^{-4}lx 的极低照度下正常工作。如集两者之优势, 取长补短, 可以产生新一代像传感器。美国仙童公司在军方的资助下, 研发成功了微光成像用 CCD/CMOS 混合像传感器^[15] (见图 29)。它将 2 个读出噪声极小的 CMOS 读出集成电路 (ROIC) 用钢键合在 CCD 像传感器的基底上, 取代了读出噪声较大的 CCD 串联移位寄存器。由于 CCD 的暗噪声和电荷传输噪声极小, 2 个读出口和并列读出结构有效地减小了读出带宽, 加上 ROIC 是电容跨导阵列, 噪声极小, 因而这个混合器件的总噪声水平极低。由于取消了 CCD 的移位寄存器及其驱动时钟和输出放大器 2 个电源, 降低了功耗。在 CMOS 芯片上还集成了双取样电路、A/D 转换器、定时器、数控和信号处理器等外围电路。实现了在芯片上相机的紧凑结构。

这个昼夜兼容全天候工作的 CCD-CMOS 混合微光像传感器的主要性能为, $12\mu\text{m}$ 正方形像素, 像素数为 1280×1024 , 暗电流 $2.8\text{pA}/\text{cm}^2$ (室温), 读出噪声 $<2.9\text{e}^-$ (30frames/s)。如图 30 所示, 信噪比和 EMCCD 相近。

3.4 钢镓砷短波红外微光像传感器

2000 年 10 月美国传感器公司推出了钢镓砷 (InGaAs) 短波红外 (SWIR) 焦平面阵列 (FPA) 微光像传感器。立即引起了美国国防高科技项目计划局 (DARPA) 的注意。这是因为:

1) 由图 4 图可知, InGaAs 像传感器之光谱响应与

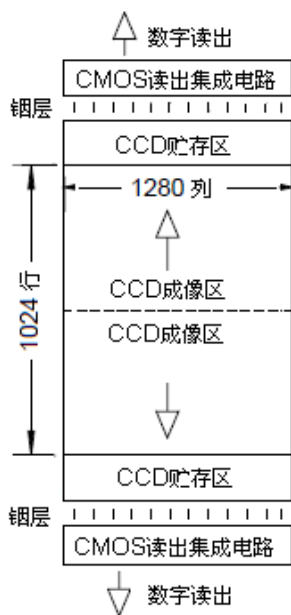


图 29 CCD-CMOS 混合微光像传感器示意图
Fig.29 Architecture of CCD/CMOS hybrid sensor

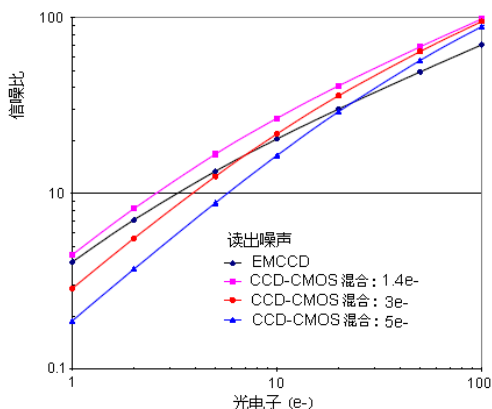


图 30 EMCCD 和 CCD-CMOS 混合像传感器的信噪比
Fig.30 SNR of EMCCD and CCD-CMOS hybrid

夜天光的匹配率比三代 GaAs 光阴极高近一个数量级，能更好的利用夜天光资源。更适用于微光被动成像。

2) 由图 31 可知，InGaAs 材料的量子效率高与 Si 材料，远高于三代 GaAs 光阴极。可见光-短波红外敏感的 InGaAs 在 1550 nm 的辐射灵敏度约为 1000 mA/W，背照 CCD 的峰值辐射灵敏度约为 320 mA/W，而 GaAs 光阴极约为 60 mA/W。如图 32 所示，和 ICCD 比较 InGaAs 有较高的灵敏度、信噪比、分辨率和动态范围。

3) InGaAs 形成的短波红外图像与黑白相机摄取的图像类似，与人的视觉系统相容。能在极短的时间内作出正确的判断。

4) 有较好的透雾霾、烟尘、灰尘能力（见图 33）。

5) 和原有的碲镉汞 (HgCdTe) 和铟化铟 (InSb)

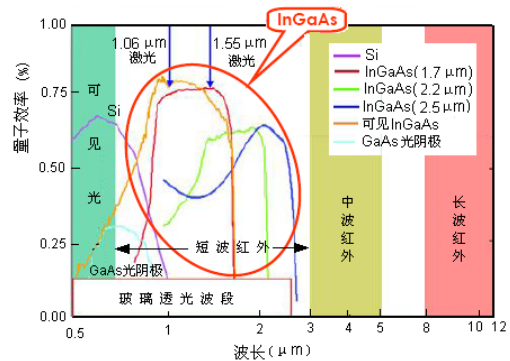


图 31 InGaAs 的光谱响应 Fig.31 InGaAs spectral response

短波红外像传感器比较，InGaAs 不仅性能好，体积小、重量轻、功耗低，而且不需要致冷。见表 3。

6) 如在 InGaAs 像素内嵌入雪崩二极管 (Avalanche Photodiode APD)，可以接受 850 nm、1060 nm、1550 nm 激光。实现观瞄、测距二合一。

7) InGaAs 现已模块化（见图 34）。结构紧凑，体积小、重量轻、环境适应性强，昼夜兼容全天候工作。可以提供数字或模拟视频输出，多功能，且操作简单。能为声音、图像信息的传输，战场指挥和管理提供安全、可靠的平台。

2008 年 1 月美国 Sensor 公司与美国国防部高科技项目计划局 (DARPA) 签订了研发“头部配戴和微型车用下一代微光夜视成像用微型传感器”合同，合同要求 3 年内研发质量小于 10 g，分辨率为 640×512 的微光夜视用碲镉砷 (InGaAs-NV) 短波红外传感器。

碲镉砷短波红外技术异军突起，成为微光夜视技术的重要手段，也可以与热像融合相辅相融。可以预料在不久的将来，在军事应用领域的高端市场，该器件将成为微光像增强器、增强 CCD/CMOS 和微光 CCD/CMOS 的重要竞争者。

4 结束语

20 世纪在微光像传感器中，像增强器一花独秀。而本世纪则是像增强器、L3CCD/CMOS、EBCCD、

EBAPS、EMCCD、InGaAs 等像传感器百花争艳，群星灿烂的时代。目前我国微光夜视技术仍未突破物镜+像增强器+目镜的模式，未能将信息技术等高科技成果应用于微光夜视技术，和国际先进水平还有近 20 年的差距。应紧跟世界上微光夜视技术的发展轨迹，解放思想，抓住机遇，开拓创新，扩展知识和专业，改善人才结构，优化软硬件条件，尽快步入以固体微光像传感器为主导，固体、真空微光像传感器共荣的新阶段。赶超世界先进水平，为四个现代化服务。



图 32 ICCD 和 InGaAs 观察效果比较

Fig.32 Comparison photos of ICCD and InGaAs

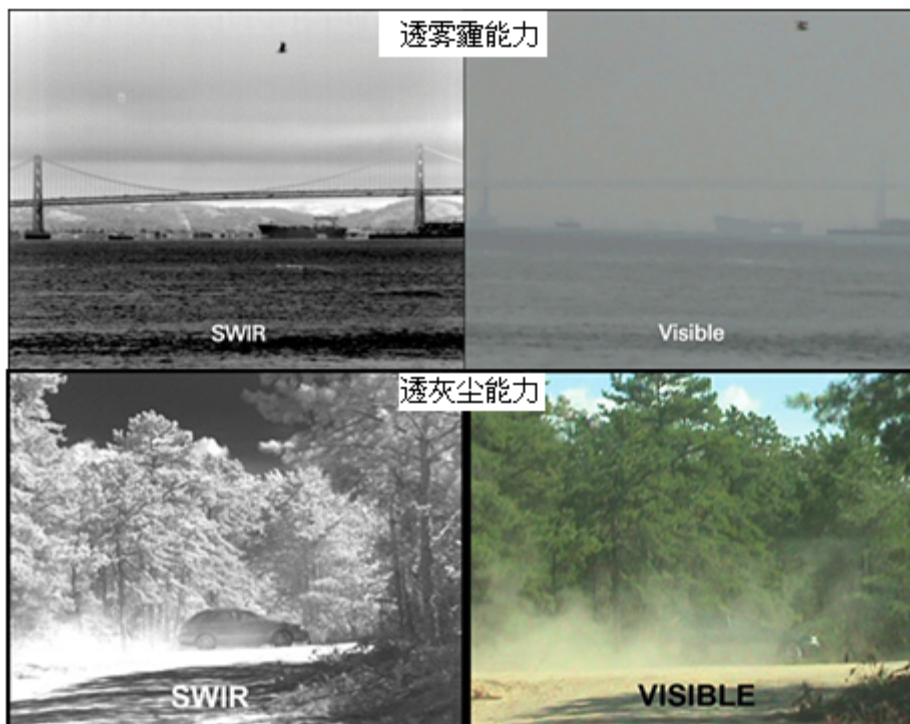


图 33 InGaAs 短波红外相机和可见光相机透雾霾和透灰尘能力比较

Fig.33 Through the haze and dust capacity of .InGaAs shortwave infrared camera and visible light camera

表 3 各种短波红外像传感器性能比较

Table 3 Performance comparison of short wave infrared image sensors

性能	InGaAs	HgCdTe	InSb
工作温度	常温不需致冷	致冷到 120 K	致冷到 120 K
光谱范围 (QE>65%)	0.9~1.7 μm	1~2.6 μm	1~2.6 μm
探测率 $D^*(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W})$	1.5×10^{13} (295 K)	2×10^{10} (77 K)	2×10^{10} (77 K)
功耗	<2.5 W	不规定	不规定
实用性	体积小、重量轻 功耗低、袖珍型	需致冷，高功耗 不能小型化	需致冷，高功耗 不能小型化



图 34 InGaAs 像传感器模块

Fig.34 InGaAs image sensor module

参考文献:

- [1] 李晓峰, 瞿利平, 黄建民, 等. 超二代像增强器多碱阴极电子逸出机理研究[J]. 红外技术, 2012, 34(12): 729-733.
- [2] Jesse Battaglia, Robert Brubaker. High speed short wave infrared (SWIR) imaging and range gating cameras[J]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6541**: 654106.
- [3] Cameron A. Marconi avionics integrated night vision in helmet-mounted displays[J]. *GEC REVIEW*, 1999, **14**: 1.
- [4] Hansen P. Overview of SWIR detectors, camera, and application[J]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6939**: 693901.
- [5] Modmaw B. Camera technologies for low light level imaging: overview and relative advantages, <http://www.Hamamatsu.com>
- [6] Hamamatsu technical. Fiber optic plate with scintillator for digital x-ray image, 1996, <http://www.Hamamatsu.com>
- [7] Stanford computer optics Inc. ICCD camera technology. <http://www.stanfordcomputroptics.com>
- [8] George M. Electron bombarded back-illuminated CCD sensors for low light level imaging applications[J]. *Proc. of SPIE*, 1995, **2415**: 211-235.
- [9] Verle W. EBAPS®: next generation, low power, digital night vision[C]// *OPTRO 2005 International Symposium May 10, 2005, Paris, France*.
- [10] Intevac Photonics. E3010M digital image intensifier (DI2). http://www.intevac.com/Intevac_photonics.
- [11] Paul J, Peter P. The LLLCCD: low light imaging without the need for an intensifier. <http://www.marconitech.com/lllccd/>.
- [12] L3C216 series Very high sensitivity camera. <http://www.e2v.com/imaging>
- [13] 姚立斌. 低照度 CMOS 图像传感器技术[J]. 红外技术, 2013, **35**(3): 125-132.
- [14] Boyd F, Chiao L. Low-light-level CMOS image sensor for digitally fused night vision systems[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, **7298**: 729849.
- [15] Liu Xinqiao(chiao). CCD/CMOS hybrid FPA for low light level imaging. <http://www.fairchildimaging.com>.