

CCD 成像探测器

朱耆祥

人类感知外部世界主要是通过视觉、触觉、听觉和嗅觉等感觉器官获取各种信息的，其中约 80% 的信息是由视觉获取的。很早以前人们就幻想“千里眼”，借助于它人们可以看到千里之外的一切。这一幻想在成像探测器出现以后已经成为现实。到今天人们不只是看到了千里之外人眼所能看到的一切，而且可以获取人眼看不到的信息。所有这一切都归功于成像探测器。

成像探测器有很多种类，目前应用最多、最广的是电荷耦合阵列探测器——CCD(Charge Coupled Devices)成像器件。1970 年美国贝尔实验室的威拉德·博伊尔和乔治·史密斯首先提出了 CCD 的概念，以后又建立了一维势阱模型为基础的 CCD 基本理论。近四十年的不断发展，到今天 CCD 已经成为从哈勃望远镜、登月空间飞行器和火星探测器到我们日常生活中的很多用具，如手机、电视等都离不开的成像探测器。CCD 成像探测器像人的视网膜，它和相应的光学系统结合被放在空间、地面、水中、机器中、甚至人体内，代替了人的眼睛，对所有人们感兴趣的目标进行观察和记录。提供给人们大量的信息，以进行各方面的分析、考察和使用。CCD 在人类的各项活动中：日常生活、生产建设、交通运输、通信联络、安全保卫、医疗卫生、科学研究、军事装备等各方面都起到重大的、不可取代的作用。

随着 CCD 应用领域的扩大，使用要求的不断增新，其结构性能也不断发展变化以适应不断发展的使用要求。目前已出现了多种 CCD 的结构类型，从紫外到超长波红外不同波段的探测器。

随着使用要求的日益更新，CCD 探测器也面临着其他类型成像探测器的非常激烈的竞争。也许在不久的将来 CCD 会被另一种成像探测器所取代。

CCD 的工作原理和结构

CCD 成像探测器（芯片）的主要功能是：光电转换、电荷储存、电荷转移、电子图像的生成和输出。由此，CCD 相机的主要组成有：CCD 芯片、驱动电路、信号处理电路、输出接口电路及探测器的机械部分。CCD 相机的核心是 CCD 芯片。

CCD 的基本单元（像元）是光敏二极管结构。

由杂质浓度较低的 p 型硅片作衬底，在 p 型硅片衬底上扩散一个 n+区形成 p-n 结二极管，即光敏二极管。在硅片表面覆盖一层二氧化硅绝缘层，在绝缘层上做有金属铝电极。将绝缘层上的电极施加正偏压时，在硅片靠近绝缘层附近形成空穴耗尽区。它随正偏压的增大而向硅片内部延伸。这就形成所谓 CCD 的势阱。当光照射到光敏单元上时激发出光电子，由入射光激发的光电子即注入这势阱存储起来。这样，即实现 CCD 的光电转换和储存。当相邻金属电极的正偏压不同时，在硅片的对应处形成不同深度的势阱，如果对相邻的各电极施加按一定规律变化的偏压时，硅片上相邻的势阱深浅就按一定规律变化。存放在势阱内的电荷就会随势阱的深浅变化而由浅势阱转向深势阱。这样，当相邻电极的偏压按节拍由小到大变化时，在势阱内的电荷就会沿势阱由浅至深的方向转移，实现了电荷的转移。

CCD 的类别和其演变

CCD 成像探测器可按照其结构、工作波段进行分类。按结构的维数分类，CCD 分为线阵 CCD 器件和面阵 CCD 器件。

由 CCD 的工作原理和基本结构可以看出：CCD 是一种阵列式光敏单元组成的器件。最初由于技术水平的限制，人们仅制造了光敏单元成一维线排列的线阵 CCD 成像器件。在光敏单元阵列的两边或一边，安置了电荷转移的转移栅和位移寄存器。在每个位移寄存器的尽头又安置了电荷输出放大器。转移栅是用来将光敏单元光电转换的电荷，由光敏区转移到位移寄存器的。转移栅和位移寄存器都是被遮挡的，只有光敏单元可以接收光照。这就是线阵 CCD 成像器件。

按照转移栅和位移寄存器及光敏单元阵列的数量和机构不同，线阵 CCD 有三种：

1)单沟道线阵 CCD 器件：只有一条转移栅和位移寄存器，位于光敏单元阵列一边，其转移效率较低。

2)双沟道线阵 CCD 器件：有两条转移栅和位移寄存器，分别列于光敏单元阵列两边。其转移效率高。

3)时间延迟积分 TDI (Time Delay and Integration) CCD 器件: 多条光敏单元阵列并列在一起, 用一条转移栅和位移寄存器将信号电荷转移出去。在多光敏单元阵列间电荷向转移栅方向转移。这种器件工作时, 如目标图像在器件上的移动 (向转移栅方向移动) 和电荷在各光敏单元阵列间的移动同步, 这样便实现了目标图像多次积累曝光, 使这种线阵

成像探测器有更高的灵敏度。

随着技术的发展出现了二维阵列器件, 这即是面阵 CCD 成像器件。由于二维器件的产生, CCD 的结构就有了更多不同。目前, 大量应用的有三种结构类型: 帧转移类型 CCD (Frame transfer CCD), 全帧扫描类型 CCD (Full frame CCD) 和行间转移类型 CCD (Interline CCD) (图 1)。

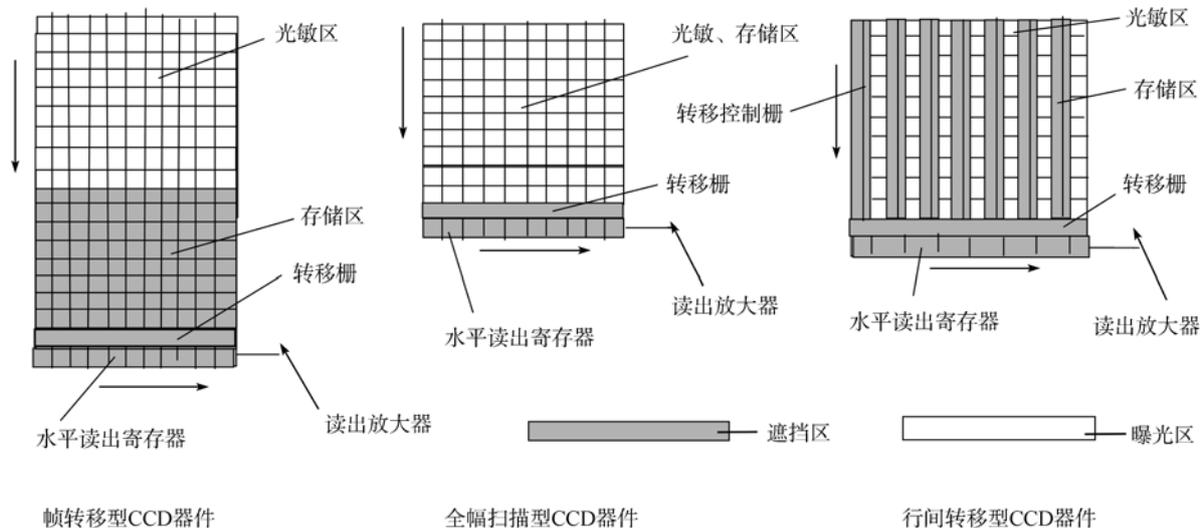


图 1 CCD 器件的三种结构

三种结构的面阵 CCD 成像器件的主要区别是光敏区和电荷存储、转移区的安置区别。

帧转移类型器件的光敏区和电荷储存区是分开的。电荷储存区被遮挡, 在器件曝光时它不受影响。可以进行电荷存储和转移。所以这类器件的曝光时间和电荷转移时间可以重叠, 从而使其帧频有所提高, 且这类器件不用机械快门。

全帧扫描类型器件的光敏区和电荷储存区是同一区, 所以当曝光时不能进行电荷转移。为了不影响图像质量, 在电荷转移时器件必须用快门遮挡, 所以它使用时必须用机械快门。

行间转移类型器件的光敏单元旁边直接安置被遮挡的电荷转移单元, 光敏单元曝光后直接将电荷转移到转移单元, 然后在下一次曝光时电荷转移单元将电荷转移。所以这类器件的曝光时间和电荷转移时间也可以重叠, 且也不用机械快门。

三种器件因结构不同就有不同的光敏元的占空比或填充因子: 第一、二种器件的占空比约为 100%, 而第三种器件的占空比约为 30%~50%; 所以, 第一、二种器件的探测灵敏度要比第三种器件高。

按工作波段 CCD 又可分为: 可见光 CCD 器件、红外 CCD 器件和紫外 CCD 器件。不同工作波段 CCD 器件的区别主要是光敏单元的材料不同。可见光 CCD 器件的光敏材料主要是硅光电二极管, 其工作波段在 400~1000nm。红外 CCD 器件的光敏单元由不同红外材料制成, 将红外探测器光敏原阵列和 CCD 集成在一起。这种器件也称为红外焦平面阵列。所用红外材料有: 碲镉汞 (HgCdTe), 其工作波长可达 18000nm 即甚长波红外或超长波红外 (VLWIR) 材料; 碲镉汞 (HgCdTe), 铅碲碲 (PbSnTe), 量子阱 (QWIR), 掺钪硅 (Si:Sc), 掺镁硅 (Si:Mg) 等, 其工作波段在 8000~15000nm, 即长波红外 (LWIR) 材料; 碲化铟 (InSb), 碲镉汞 (HgCdTe), 砷化铟 (InAs), 硅化铂 (PdSi), 量子阱 (QWIR), 掺镍硅 (Si:Ni), 掺硫硅 (Si:S), 掺钛硅 (Si:Ti) 等, 其响应波段为 3500~5000nm, 即中波红外 (MWIR) 材料; 硅化铂 (PdSi) 和硅等其工作波段为 1000~3000nm, 即短波红外 (SWIR) 和 (700~1000nm) 近红外 (NIR) 材料。

上述材料的红外焦平面多需要进行制冷工作。

另有非制冷型红外热敏探测器，其工作原理是光能先转换成热能，再由光敏元的温度变化引起的物理参数变化探测红外辐射。所以它的灵敏度与波长关系不大。此类材料有热敏电阻型和热释电型探测器。

CCD 成像探测器的主要技术性能和 技术性能的提高

CCD 成像探测器的性能是在实际使用中，通过 CCD 相机的性能体现出的。在不同使用要求中人们注意的技术性能不同。但在各种用途中普遍注意的技术性能有：

- 光谱灵敏度：即 CCD 在各光谱波段的响应率。对于单色光 CCD 相机只要求其白光（即各光谱波段的平均值）响应率。

- 图像读出速率或相机的帧频：即相机每秒能读出的全幅图像数目。

- 读出噪声：即在输出目标图像上附加的噪声。一般噪声是由暗噪声、信号噪声、固定结构噪声、相机的读出噪声等组成。噪声大的相机输出的图像不清晰，有噪声麻点。对于点状目标，噪声大时往往把目标淹没。

- 图像分辨力：即所观察图像的最小分辨单元。一般用每 mm 能分辨的线对数表示。对 CCD 相机或芯片而言多用像元数表示。如 xxx 万像素，或行有效像素×有效行数表示。

- 芯片的有效成像面积：它往往决定了摄像系统的成像视场大小。

- 器件的动态范围：即器件正常工作的光照照度变化范围。它等于器件的满阱电荷和噪声的比值。

随着科学技术的不断发展对 CCD 技术性能的要求不断提高。在探测灵敏度上人们用多种方法提高 CCD 的性能。在这方面有几种途径：

在结构上与其他器件结合形成高灵敏度探测器：如 CCD 与像增强器结合形成增强型 CCD (ICCD-Intensified CCD) 成像探测器，电子轰击型 CCD (EBCCD Electronic bombardment CCD) 成像探测器。前者是将像增强器用光纤维与 CCD 耦合使用形成 ICCD 成像探测器，后者是将像增强器的荧光屏用 CCD 代替形成 EBCCD 探测器。这两种探测器都有很高的灵敏度，因为它们有像增强器的高增益。其增益可达到 $10^4 \sim 10^5$ 倍。但是，它们也具有像增强器的缺点：寿命问题、噪声大。

为了避免上述问题，最近人们又研制了一种称

为 EMCCD (电子倍增 CCD) 的芯片。它目前还采用帧转移型 CCD 芯片结构，但是把水平转移寄存器加长，并在信号转移时加高值偏压，利用电子轰击效应，使信号电荷随寄存器单元转移时产生附加信号电子。这样一级级造成信号的增益。这种增益避免了像增强器的噪声随目标信号增大而增大的弊病，又避免了像增强器阴极的寿命问题。目前这种器件的增益已可达到 2000X，且可在较高的光照下工作，有很大的动态范围。

除以上的改进之外，还可以用 CCD 减薄和背照的措施提高其探测灵敏度。在入射光照到 CCD 靶面上时，CCD 表面的电极会对它进行反射，使入射光不能全部转换为光电子，降低了 CCD 的灵敏度。此外入射光子在低电场区生成的光电子，往往大部分被复合而淹没，收集到势阱内的光电子很少。将入射光从 CCD 背面照射，即采用背照式 CCD 即可避免电极的反射。但用厚型 CCD 时其背面增透膜镀层受影响较大，将 CCD 的硅基底减薄使整个厚度上都是高电场区，这样使入射光子转化为光电子并存储于势阱的比例大大提高，从而提高了器件的灵敏度。背照减薄 CCD 对红光灵敏度低，因为红光可以穿透减薄的 CCD 而不被探测，所以用厚度为 $40\mu\text{m}$ 的高阻硅制作 CCD，使红光不能透过，并使整个厚度均处于高电场，增大势阱深度，即形成深耗尽 CCD。它对可见光和红光都有高的量子效率。目前，前照式 CCD 的量子效率最高只在 50%~60%，而利用上述措施可以使 CCD 的量子效率提高到 92%~95%。

对于行间转移型 CCD 由于其填充因子小，使灵敏度降低。为提高灵敏度，人们采用了微透镜阵列集成在 CCD 上，使每个微透镜聚焦在光敏原中心，微透镜的尺寸做成与 CCD 像元间距相等。这样组合器件的填充因子接近于 100%，从而提高了 CCD 的灵敏度。

为了提高 CCD 对目标的探测能力，需降低 CCD 的噪声。CCD 的噪声中暗噪声占重要地位，特别是对于长积分曝光工作的 CCD 更是重要。为降低暗噪声，人们对 CCD 采用了制冷措施，使 CCD 在低温下工作。制冷温度有时达到 -100°C 。在这样的低温下工作，CCD 的暗噪声可达到每秒每个像元小于百分之一电子。

提高 CCD 探测灵敏度的另一方法是采用

Binning 模式工作。所谓 Binning 模式即将 CCD 的像元在行方向和列方向，用两个或多个像元合并为一个像元工作。如 2×2 、 4×4 、 8×8 等模式工作。由于像元面积增大了所以每个像元所接受的入射光子数也增多了，其输出信号幅值自然增大。接受灵敏度随之提高。此外，这种方法还提高了 CCD 的帧频，因为像元在合并后总像元数减少了，如果驱动频率不变，帧频自然是要提高的。

CCD 的分辨力是和其像元尺寸直接相关的。目前一般使用的 CCD 相机像元尺寸多在 $7.5 \sim 24 \mu\text{m}$ 。这种尺寸大小比摄影胶片的分辨力要低一些。目前能够做到的、已经有产品的 CCD 像元尺寸最小可以达到 $4.75 \mu\text{m}$ ，如 Kodak 的 KAI-10100 (2648×2760 像元)，这一尺寸已经接近摄影胶片的感光颗粒尺寸了。在 CCD 芯片的有效敏感面积上和像元数目上，目前世界上最大的成品 CCD 芯片为 10240×10240 像元，其像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。这样 CCD 芯片的有效敏感面积达到 $153.6 \text{mm} \times 153.6 \text{mm}$ 。当然它还未达到摄影胶片的最大尺寸。

CCD 芯片的尺寸与目前能做出的硅片尺寸有关。由于硅片尺寸的增大受到一些技术上的限制，无法制造很大的 CCD 芯片。为了在现有 CCD 靶面尺寸情况下获得大的摄像靶面，人们采用了多块 CCD 拼接的办法。把多块 CCD 芯片拼接在一起组成一个大的探测靶面。世界上已经使用的最大拼接靶面是 Palomar 天文台 1.26m Schmidt 望远镜的靶面——QUEST Camera 靶面。它由 112 块背照式 CCD (600×2400 像元，像元尺寸 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$) 拼接而成。其总有效敏感面积达到 $250 \text{mm} \times 193 \text{mm}$ ，形成望远镜视场角为 $4.5^\circ \times 3.6^\circ$ (望远镜焦距：3.06M)。其相机靶面可制冷到 -100°C ，其暗电流为 $0.1 \text{e}^-/\text{s}$ ，量子效率在 95%。

其他成像探测器和 CCD 探测器的比较

目前成像探测器除 CCD 探测器外，应用较多的还有 CMOS 成像探测器。CMOS 成像探测器的结构和 CCD 有所区别。CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, 互补性氧化物金属半导体) 探测器是一种基于 CMOS 技术的成像探测器。它由光敏元阵列和辅助电路构成。有源像敏单元结构 (APS: Active pixel sensor) 的探测器，其光敏元实现光电转换和像素内的电荷放大，所以一个像元的面积中光敏区只占一部分，占空比小。光电转

换后信号电荷通过 X 为 Y 寻址方式读出。辅助电路完成驱动信号产生、光电信号处理和输出等工作。APS 型 CMOS 成像器件有消噪声功能，不受电荷转移效率的限制，读出速度快。

CCD 成像探测器和 CMOS 成像探测器比较其各自的特点如下：

CMOS 探测器的特点是：读出速度快(可达到全副图像 $500 \sim 1000 \text{fps}$)、辅助电路可集成在芯片内、成本低、体积小、占空比小 (一般在 $20\% \sim 30\%$)、灵敏度相对低 (QE 不大于 40%)，噪声较大。高速摄像机基本都用 CMOS 器件。

CCD 探测器的特点是：灵敏度高 (QE% 可达到 $92\% \sim 95\%$)，占空比大 (除行间转移 CCD 外，一般在 $95\% \sim 100\%$)，读出速度不能很高 (最高不能超过 200fps)，像元尺寸一般在 $7 \sim 25 \mu\text{m}$ (最小达到 $4.75 \mu\text{m}$)，噪声可控制到较低水平，制造成本高。

在应用中一般民用产品由于考虑成本低的问题，多用 CMOS 成像探测器，但是在要求技术性能较高的成像探测器，如科学研究中使用的探测器、军事应用中的成像探测器、低照度下使用的成像探测器等，还是优先选择 CCD 探测器。

但是，随着技术的不断发展，CMOS 成像探测器在不少领域的应用中已有逐步代替 CCD 成像探测器的趋势。目前出现的 SCMOS 成像探测器 (即科学 CMOS 探测器)，由于把微透镜阵列和 CMOS 芯片集成在一起，其占空比可达到约 $80\% \sim 85\%$ ，量子效率已可达到 60%，其读出噪声在较高读出频率下已可达几个电子。而其读出频率比 CCD 探测器高且不用机械快门。如最近美国仙童公司生产的 CAM2051 CMOS 相机，其像元数目为 2560×2160 ，像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ ，全副帧频达到 30fps ，ROI 模式下仅读出 1028×1024 像元时可达 100fps ，其量子效率达到 60% (峰值在 600nm)，而读出噪声在 30fps 时仅有 $2 \text{e}^- \text{RMS}$ ，这样其动态范围就达到了 $83 \text{dB} (15000:1)$ 。而 CMOS 成像探测器的成本却大大低于 CCD 成像探测器。

CMOS 成像探测器的尺寸也在不断增大，像元尺寸不断减小。这就大大提高了其分辨力。如 Kodak 的 KAC05010 CMOS 芯片像元数已达到 2592×1944 ，而像元尺寸仅 $2.2 \mu\text{m}$ ，其分辨力已可以和摄影胶片相比美。

(成都中国科学院光电技术研究所 610209)