

CMOS 图像传感器及其发展趋势

倪景华, 黄其煜

(上海交通大学 微电子学院, 上海 200240)

摘要:本文简要介绍了 CMOS 图像传感器的发展历程及工作原理, 对 CCD 图像传感器与 CMOS 图像传感器的优缺点进行了比较, 指出了 CMOS 图像传感器的技术优势, 并讨论了 CMOS 图像传感器的发展趋势。

关键词:互补金属氧化物半导体; CCD 图像传感器; CMOS 图像传感器

中图分类号: TN386

CMOS Image Sensor and Its Development Trend

NI Jing-hua, HUANG Qi-yu

(School of Microelectronics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The development history and principle of CMOS image sensor is described. The advantages of CMOS image sensor are discussed with comparison to CCD image sensor. The current development and tendency of CMOS image sensor are presented.

Keywords: CMOS; CCD; CIS

1 引言

现代人类生活中, 人们迫切需要获取各类信息, 其中以视觉器官为渠道获取的图像信息居多。据统计, 人们所获取的信息, 80%以上是通过视觉器官得到的。随着半导体技术水平的不断提高, 图像传感器(Image Sensor)作为目前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, 给出直观、多层次、内容丰富的可视图像信息, 而在现代社会生活中得到越来越广泛的应用。目前, 图像传感器主要分 2 类, 电荷耦合器

件(Charge-Coupled Device, CCD)和互补金属氧化物场效应管(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)图像传感器。

自从上世纪 60 年代末期, 美国贝尔实验室提出固态成像器件概念后, 固体图像传感器便得到了迅速发展, 成为传感技术中的一个重要分支, 它是 PC 机多媒体不可缺少的外设, 也是监控设备中的核心器件。互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器与电荷耦合器件(CCD)图像传感器的研究几乎是同时起步, 但由于受当时工艺水平的限制, CMOS 图像传感器图像质量差、分辨率低、噪声降不下来和光照灵敏

度不够,因而没有得到重视和发展。而由于 CCD 可以在较大面积上有效、均匀地收集和转移所产生的电荷并低噪声地测量,因此在过去 20 年,CCD 器件一直主宰着图像传感器市场^[1]。但是最近 10 年,由于集成电路设计技术和工艺水平的提高,CMOS 图像传感器过去存在的缺点现在都可以找到办法克服,而且它固有的诸如像元内放大、列并行结构,以及深亚微米 CMOS 处理等独特的优点更是 CCD 器件所无法比拟的,而且与 CCD 技术相比,CMOS 技术集成度高、采用单电源和低电压供电、成本低和技术门槛低。低成本、单芯片、功耗低和设计简单等优点使 CMOS 图像传感器在保安监视系统、可视电话、可拍照手机、玩具、汽车和医疗电子等低端像素产品领域中大出风头。这些方面的应用驱动了 CMOS 图像传感器市场的快速增长,使它再次成为研究的热点。

70 年代初,CMOS 传感器在美国航空航天局(NASA)的 Jet Propulsion Laboratory(JPL)制造成功。80 年代末,英国爱丁堡大学成功试制出了世界第 1 块单片 CMOS 型图像传感器件。1995 年,像元数为 128×128 的高性能 CMOS 有源像素图像传感器由 JPL 首先研制成功。1997 年,英国爱丁堡 VLSI Version 公司首次实现了 CMOS 图像传感器的商品化。就在这一年,实用 CMOS 技术的特征尺寸达到了 $0.35 \mu\text{m}$,东芝研制成功了光电二极管型 APS(Active Pixel Sensor),其像元尺寸为 $5.6 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$,具有彩色滤色膜和微透镜阵列。2000 年,日本东芝公司和美国斯坦福大学采用 $0.35 \mu\text{m}$ 技术开发的 CMOS-APS 已成为开发超微型 CMOS 摄像机的主流产品。目前国内,中芯国际也已经量产了应用 $0.18 \mu\text{m}$ 技术的 CMOS 图像传感器。制造工艺的进步和新产品的不断推出预示着 CMOS 图像传感器的时代即将到来。

2 CMOS 图像传感器 CIS 的结构及工作原理

MOS 图像传感器的概念最早出现在 20 世纪 60 年代,但当时由于大规模集成电路工艺的限制未能

进行研究^[2]。普遍意义上的 CMOS 图像传感器的研究是从 80 年代早期开始,而从实验室走向产品化则是在 90 年代早期。CMOS 图像传感器的研发大致经历了 3 个阶段:CMOS 无源像素传感器(CMOS-PPS, Passive Pixel Sensor)阶段、CMOS 有源像素传感器(CMOS-APS, Active Pixel Sensor)阶段和 CMOS 数字像素传感器(CMOS-DPS, Digital Pixel Sensor)阶段。

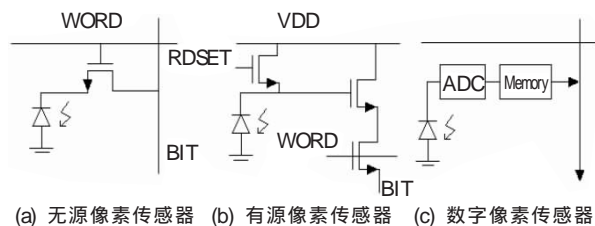


图 1 CMOS 图像传感器像素结构

2.1 无源像素图像传感器

在上世纪 60 年代后期, G. Weckler 就提出了无源像素传感器结构的 CMOS 图像传感器^[2-3]。这种结构至今几乎没有发生较大变化,它的无源像素结构如图 1(a)所示:它包括 1 个光电二极管和 1 个 MOS 开关管。光电二极管用于将入射的光信号转换为电信号;MOS 开关管的导通与否取决于器件像元阵列的控制电路。在每一曝光周期开始时, MOS 开关管处于关断状态,直至光敏单元完成预定时间的光电积分过程, MOS 开关管才转入导通状态;此时,光电二极管与垂直的列线连通,光敏单元中积累的与光信号成正比的光生电荷被送往列线,由位于列线末端的电荷积分放大器转换为相应的电压量输出(电荷积分放大器读出电路保持列线电压为一常数,并减小像元复位噪声);当光电二极管中存储的信号电荷被读出时,再由控制电路往列线加上一定的复位电压使光敏电源恢复初始状态,随即再将 MOS 开关管关断以备进入下一个曝光周期。在此结构下,还可以采用另外一个开关管以实现二维的 X-Y 寻址。

由于 PPS 像元结构简单、面积很小,所以在给定的单元尺寸下,可设计出最高的填充系数(Fill

Factor, FF, 又称“孔径系数”, 即像元中有效光敏单元面积与像元总面积之比); 在给定的设计填充系数下, 单元尺寸可设计的最小。并且, 由于填充系数高和没有类似许多 CCD 中的多晶硅层叠, 无源像素结构可获得较高的“量子效率”(即光生电子与入射光子数量之比), 从而有利于提高器件的灵敏度。

但是这种结构存在着 2 个方面的不足: 其一, 各像元中开关管的导通阈值难以完全匹配, 所以即使器件所接受的入射光线完全均匀一致, 其输出信号仍会形成某种相对固定的特定图形, 也就是所谓的“固有模式噪声”(Fixed Pattern Noise, FPN), 致使 PPS 的读出噪声很大, 典型值为 250 个均方根电子, 较大的固有模式噪声的存在是其致命的弱点; 其二, 光敏单元的驱动能量相对较弱, 当图像传感器规模不断增大后, 总线上电容相应增加传感器读出速度大幅降低, 故而列线不宜过长以期减小其分布参数的影响。受多路传输线寄生电容及读出速率的限制, PPS 难以向大型阵列发展^[4]。

2.2 有源像素图像传感器

有源像素单元 APS 几乎与无源像素单元一起出现。图 1(b) 所示的是有源像素传感器结构: 它包括光电二极管、复位管、源跟随器有源放大管和行选读出晶体管。在此结构中, 输出信号由源跟随器予以缓冲以增强像元的驱动能力, 其读出功能受与它相串联的行选晶体管(RS)控制。因源跟随器不再具备双向导通能力, 故需另行配备独立的复位晶体管(RST)。光照射到光电二极管产生电荷, 这些电荷通过源极跟随器缓冲输出; 当读出管选通时, 电荷通过列总线输出。读出管关闭, 复位管打开对光电二极管复位。上述只是一个简单的原理性过程, 在实际工作时, 其读出、复位是有不少讲究的。例如, 为了抑制固定图形噪声需采用相关双采样, 不但要读取信号电压, 还要读取复位后光电二极管的电压。

由于这种结构相对无源像素传感器结构在像素单元里增加了有源放大管, 于是减小了读出噪声并且它的读出速度也较快; 由于有源像元的驱动能力

较强, 列线分布参数的影响相对较小, 因而有利于制作像元阵列较大的器件; 另外, 由于有源放大管仅在读出状态下才工作, 所以 CMOS 有源像素传感器的功耗比 CCD 图像传感器的还小。这种结构的 APS 量子效率比较高, 由于采用了新的消噪技术, 输出图形信号质量比以前有许多提高, 读出噪声一般为 75~100 个电子。而像元本身具备的行选功能, 对二维图像输出控制电路的简化颇有益处。

但是, 有源像素传感器在提高性能的同时也付出了增加像素单元面积和减小“填充系数(Fill Factor)”的代价^[5,6]。APS 像元结构复杂, 与 PPS 像元结构相比(无源像元的孔径效率多在 60%~80%之间), 其填充系数较小, 设计填充系数典型值为 20%~30%, 与行间转移 CCD 接近, 因而需要一个较大的单元尺寸。为了补偿有源像素填充系数不高引起的不足, CMOS 器件往往借用 CCD 制造工艺中现有的“微透镜”技术, 就是在器件芯片的常规制作工序完成后, 再利用光刻技术在每个像元的表面直接制作一个微型光学透镜, 借以对入射光进行会聚, 使之集中投射于像元的光敏单元, 从而可将有源像元的有效填充系数提高 2~3 倍, 提高信号质量。深亚微米技术的采用将会大幅提高填充率。

2.3 数字像素图像传感器

上面提到的无源像素传感器和有源像素传感器的像素读出均为模拟信号, 于是它们又通称为模拟像素传感器。近年来, 美国斯坦福大学提出了一种新的 CMOS 图像传感器结构—数字像素传感器(DPS), 在像素单元里集成了 ADC(Analog-to-Digital Converter)和存储单元, 如图 2(c)所示。由于这种结构的像素单元读出为数字信号, 其它电路都为数字逻辑电路, 因此数字像素传感器的读出速度极快, 具有电子快门的效果, 非常适合高速应用, 而且它不像读出模拟信号的过程, 不存在器件噪声对其产生干扰。另外, 由于 DPS 充分利用了数字电路的优点, 因此易于随着 CMOS 工艺的进步而提高解析度, 性能也将很快达到并超过 CCD 图像传感器, 并且实

现系统的单片集成。

数字像素图像传感器的主要缺点在于因为增加了像素单元内的晶体管数目而需要较大的像素单元面积,而且随着芯片加工工艺的不断发展,接口电压在不断降低,漏电流也在不断增加,DPS的设计和制造也面临着较大的挑战^[7]。目前,这种传感器还处于研究阶段。

以上介绍了3种不同类型的图像传感器结构,其中发展最快的是CMOS-APS。这种类型的图像传感器器件已经进入商品化和实用化阶段,但是对全面改善CMOS-APS性能的研究工作还在深入进行。CMOS图像传感器能够快速发展,一是基于固体图像传感器技术的研究成果,二是得益于CMOS集成电路工艺技术的成熟。在CMOS取代CCD的进程中,生产工艺将是弥补CMOS图像质量和亮度不足的关键。

3 CIS的技术优势

CMOS图像传感器和CCD在光检测方面都是利用了硅的光电效应原理,不同点在于像素光生电荷的读出方式。CCD是通过垂直和水平CCD转移输出电荷,而在CMOS图像传感器中,电压通过与DRAM存储器类似的行列解码读出。

CMOS与CCD图像传感器在结构、工作方式和制造工艺兼容程度上的差别,使得CMOS图像传感器具有CCD所不具有的一些优点:

(1)CMOS图像传感器能将光电探测器、电荷/电压转化单元、复位和选择晶体管、电压放大器以及数/模(ADC)转换电路集成在一块芯片里,整个阵列使用简单的X-Y排位技术,输出信号由列和行读取电路构成,这些外围电路也可以集成在芯片内,因此CMOS图像传感器输出的数字信号可以直接进行处理。

(2)CMOS电路的基本特性是静态功耗几乎为零,只有在电路接通时才有电能的消耗。另外CMOS电路只需单一电压供电,而CCD是大电容器

件,驱动电路的功耗大,且需多相时钟驱动^[8],因此CMOS图像传感器的耗电量只有普通的由二极管组成的CCD图像传感器的1/10左右。

(3)随着CMOS工艺的发展,CMOS晶体管变得越来越小,CMOS像素尺寸也随之变小,可以将放大器、ADC甚至影像数字信号处理电路集成在芯片上,故CMOS集成度高。

(4)CMOS制造成本低、结构简单、成品率高,使CMOS图像传感器在价格上与CCD图像传感器相比具有优势。

(5)由于CCD的像素由MOS电容构成,电荷激发的量子效应易受辐射线的影响;而CMOS图像传感器的像素由光电二极管构成,因此CMOS图像传感器的抗辐射能力比CCD大十多倍,有利于军用和强辐射应用。

(6)CMOS图像传感芯片除了可见光,对红外光也非常敏感,在890~980 nm范围内其灵敏度远高于CCD图像传感芯片的灵敏度,并且随波长增加而衰减的梯度也相对较慢。如能设计制造出在1~3 μm波长范围内敏感的CMOS图像芯片,则CIS在夜战和夜间监控上将有更广泛的应用。

进入90年代,随着多媒体市场的不断扩大,对图像传感器的应用要求也越来越高。对于许多成像系统,将驱动电路和信号处理电路集成在图像传感器上以实现系统小型化和接口简单化已变得越来越重要。同时,人们需要一种新的数字图像获取系统,能够直接将电视和照相2种图像输入到个人电脑中进行实时处理。为此,人们希望有一种图像传感器,它具有简单的时钟、单一的电源、可随机快速读取图像信息、低系统功耗、低成本等优点,以满足成像系统小型化、数字化发展的需求。

利用CMOS工艺技术制造的CMOS图像传感器,可以将图像传感器阵列、驱动电路和信号处理电路、模拟/数字转换器、改进的界面完全集成在一起,在制造上,CMOS传感器的加工采用的是大多数半导体厂家生产集成电路的流程,易于与其它

CMOS 电路集成在一起且成本较低; 同时, CMOS 只需使用一个电源供电, 在节能方面相对于 CCD 具有很大的优势。在不远的未来, CMOS 图像传感器将成为 CCD 图像传感器的替代者, 这种成像技术将推动下一代成像系统的发展。

4 CIS 的研究现状与发展趋势

目前 CMOS 图像传感器的研究热点主要有以下几个方面:

(1) 多功能、智能化。传统的图像传感器仅局限于获取被摄对象的图像, 图像的传输和处理需要单独的硬件和软件来完成。由于 CMOS 图像传感器在系统集成上的优点, 可以从系统级水平来设计芯片。如可以在芯片内集成相应的功能部件应用于特定领域, 如 Transchip 公司开发的高质量手机用摄像机, 内部集成了 ISP, 并整合了 JPEG 图像压缩功能。也可以从通用角度考虑, 在芯片内部集成通用微处理器(如 Trimedia Processor)。为了消除数字图像传输的瓶颈, 还可以将高速图像传输技术(如 Firewire、USB、基于 LVDS 的高速并行传输)集成到同一块芯片上, 形成片上系统型数字相机(Digital Camera System on Chip)和智能 CMOS 图像传感器(Intelligent CMOS Image Sensor)。斯坦福大学的 PDC(Programmable Digital Camera)研究小组和一些专业厂商合作, 在新的图像处理算法、体系结构、电路设计以及单片 PDC 的研究方面取了一些令人瞩目的果。

(2) 高帧速率。由于 CMOS 图像传感器具有访问灵活的优点, 所以可以通过只读出感光面上感兴趣的很小区域来提高帧速率。同时, CMOS 图像传感器本身在动态范围和光敏感度上的提高也有利于帧速率的提高。国家半导体公司生产的 LM9630 可达 600 帧/s 的速度; 斯坦福大学 PDC(Programmable Digital Camera)研究小组开发的单片 PDC, 在 352×288 分辨率下, 其扫描速度可达 10 000 帧/s; Dalsa 公司宣称其生产的 CMOS 图像传感器扫描速度最高

可达 20 000 帧/s; Micron 公司的 MT9M413C36ST 在 $1\,280 \times 1\,024$ 分辨率下可以达到 0~500 帧/s 的帧速率, 部分扫描时可达 10 000 帧/s。

(3) 宽动态范围。以色列工业大学(Israel Institute of Technology)的 VLSI 系统研究中心将用于 CCD 的自适应敏感技术用于 CMOS 传感器中, 使 CMOS 传感器的整个动态范围可达 84 dB, 并在一个 64×64 的芯片上进行了实验。NASA 的 JPL 实验室也致力于将 CCD 的工作模式用于 CMOS 图像传感器中。

(4) 高分辨率。目前 CMOS 图像传感器最高分辨率可达 $3\,170 \times 2\,120$ 像素, 约 616 万像素。

(5) 低噪声技术。目前用于科学研究的高性能 CCD 能达到的噪声水平为 3~5 个电子, 而 CMOS 图像传感器则为 300~500 个电子。JPL 实验室采用 APS 技术的图像传感器能达到 14 个电子。

(6) 模块化、低功耗。由于 CMOS 图像传感器便于小型化和系统集成, 所以可以根据特定应用场合, 将相关的功能集成在一起, 并通过优化设计进一步降低功耗。如 Fujitsu 公司生产的 MB86S02A 成像模块, 在每秒拍摄 15 幅画面的情况下, 功耗仅为 15 mW。

总之, CMOS 图像传感器正在向高灵敏度、高分辨率、高动态范围、集成化、数字化、智能化的“片上相机”解决方案方向发展。芯片加工工艺不断发展, 从 $0.5\ \mu\text{m}$ $0.35\ \mu\text{m}$ $0.25\ \mu\text{m}$ $0.18\ \mu\text{m}$, 接口电压也在不断降低, 从 5 V 3.3 V 2.5 V/3.3 V 1.8 V/3.3 V。研究人员致力于提高 CMOS 图像传感器的综合性能, 缩小单元尺寸, 调整 CMOS 工艺参数, 将数字信号处理电路、图像压缩、通讯等电路集成在一起, 并制作滤色片和微透镜阵列, 以实现低成本、低功耗、低噪声、高度集成的单芯片成像微系统。随着数字电视、可视通讯产品的增加, CMOS 图像传感器的应用前景一定会更加广阔。(No.7)

参考文献:

- [1]Seitz P. Solid- state image sensing [J]. New York: Academic Press, 2000, 165- 222.
- [2]Weckler G P. Operation of p- n junction photodetectors in a photon flux integration mode [J]. IEEE J. Solid- State Circuits, 1967, SC- 2(3):65- 73.
- [3]Dyck R, Weckler G P. Integrated arrays of silicon photodetectors for image sensing [J]. IEEE Trans.Electron Devices, 1968, ED- 15:196- 201.
- [4]饶睿坚, 来新泉, 李玉山. CMOS图像传感芯片的成像技术 [J].微电子学, 2001,31(4):272- 275.
- [5]Fossum E R. CMOS image sensors: Electronic camera- on- chip [J]. IEEE Trans. Electron Devices, Oct.,1997,44: 1689- 1698.
- [6]Mendis S K, Kemeny S E, et al. CMOS active pixel image sensors for highly integrated image systems [J]. IEEE J. Solid- State Circuits, 1997, 32(2).
- [7]Wong H.- S. Technology and device scaling considerations for CMOS imagers [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43:2131- 2142.
- [8]Mendis S, et al. Charge- coupled devices and solid state optical sensors IV [J]. Proc. SPIE, 1994, 2172:19- 29.

堡盟集团落户上海

国际领先的传感器和系统制造商- 堡盟集团近日在上海西郊宾馆举办了主题为“新沃土、同进步”的开业庆典, 宣布堡盟电子(上海)有限公司正式开业。

堡盟集团的首席执行官 OliverVietze 博士在开业典礼上说道:“中国市场近年来的蓬勃发展已使其成为了传感器的发展沃土。堡盟中国的成立及今天的正式开业, 意味着我们将把已在国际范围内得到认可的高科技高精密的传感技术带到中国市场, 为中国客户提供最可靠的产品、高品质的自动化元件以及高精确的自动化系统, 同时我们将结合中国的本土情况, 为客户量身定制最佳的传感解决方案。”

“我可以自豪地说, 作为传感技术的专家, 我们的产品的精确性和可靠性在市场上处于领先地位。同时, 我们在传感器的一体化和微型化上也具有杰出的专利技术, 并能利用新的传感技术——例如视觉传感器等——为客户提供解决方案; 而现代接口技术和总线技术也在我们所有的产品系列中得到运用。”堡盟集团全球销售市场总裁 RuedigerFoerster 先生说道, “另外, 堡盟的优势还在于为客户定制方案, 无论是在标准产品上作简单的改进, 还是多种传感系统的完全特殊研发, 都是我们擅长的。通过定制产品, 我们已经为许多客户提供竞争优势。而堡盟中国在保留了堡盟集团的全线产品和系统解决方案的同时, 还将不断致力于新产品的研究和开发。”

在开业典礼上特意设置了一个光电传感器启动仪式, 向在场宾客呈现堡盟引以为傲的光电传感器 10 系列。堡盟集团的几位重要管理人员携客户代表和官员一同启动了竖立在舞台上的启动道具, 壮观的感应光束随即出现, 将庆典仪式推向高潮。