

〈综述与评论〉

低照度 CMOS 图像传感器技术

姚立斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 与其他固体微光器件相比, 低照度 CMOS 图像传感器具有成本、功耗及体积优势, 是固体微光器件发展的重要方向。但目前低照度 CMOS 图像传感器的微光性能还不能满足夜视应用要求。本文介绍了低照度 CMOS 图像传感器及提高其灵敏度的几种技术途径, 采用低照度技术后 CMOS 图像传感器性能已接近实用要求。随着 CMOS 工艺技术的不断发展及低照度 CMOS 图像传感器研究的不断深入, 在不远的将来, 低照度 CMOS 图像传感器将成为固体微光器件的重要一员。

关键词: 图像传感器; 低照度技术; CMOS; CCD

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)03-0125-08

Low-light-level CMOS Image Sensor Technique

YAO Li-bin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Compared to other low-light-level image sensors, the CMOS image sensor has the cost, power and size advantages. Currently the performance of the low-light-level CMOS image sensor does not satisfy the night-vision application requirements due to relatively low sensitivity. Several techniques to increase the sensitivity of the low-light-level CMOS image sensor are introduced in this paper. The state-of-the-art designs are reviewed and their performance is close to EMCCD sensor. With the development of the CMOS technology and the further research on low-light-level CMOS image sensors, the CMOS image sensor is potentially a major player in the solid-state low-light-level image sensor market.

Key words: image sensor, low-light-level technique, CMOS, CCD

0 引言

微光成像技术广泛应用于军事及民用各领域。在微光成像领域, 目前应用的主流是真空微光器件, 通过器件中光阴极将入射光子转换为电子, 再通过微通道板的电子倍增打到荧光屏上形成亮度增强的可见光图像。

利用像增强电荷耦合器件 ICCD (Image Intensified Charge Coupled Device) 可以将真空微光器件产生的光信号转为电信号以方便后续处理。其原理为通过光纤元件或中继透镜将微光像增强器与 CCD 耦合为一体, 将经过增强的光信号转为电信号, 以实现微光成像功能^[1]。

电子轰击器件 EBCCD (Electron-Bombarded-

CCD) 利用 CCD 成像器件代替真空微光器件中的荧光屏, 将光阴极产生的光电子经过加速后轰击背照 CCD, 高能电子轰击 CCD 后产生更多电荷, 经读出后产生增强的视频图像^[1]。

以上介绍的微光成像器件均靠电子倍增器或高能电子轰击实现电信号的放大, 其特点是增益高及响应速度快, 但其电子倍增过程及电子加速过程均在真空器件中完成。真空微光器件具有较高的亮度增益、分辨率和动态范围。但由于其真空器件的本质, 体积较大, 并且电子倍增过程需要施加高压, 系统功耗较高。

近年来固体微光器件得到了飞速的发展, 与真空器件相比, 固体器件无需真空环境, 大大减小了器件的体积及重量。当前主要的固体微光器件为电

收稿日期: 2013-03-09.

作者简介: 姚立斌 (1968-), 男, 云南石屏人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为混合信号集成电路设计。

基金项目: 云南省高层次科技人才培养工程资助项目 (编号: 2011CI136)。

子倍增 CCD (EMCCD: Electron-Multiplying CCD) 器件。其主要原理是采用电荷倍增技术,即电子在强电场中漂移时发生碰撞电离,产生更多的电子,从而达到信号放大的目的。EMCCD 结合了电荷转移与碰撞电离,在光电信号多路传输的同时实现信号的放大,经过多级的电荷倍增实现高增益的光电信号放大。EMCCD 器件是一种全固体的微光器件,无需像增强器,因而其体积、功耗等指标都比真空微光器件要好。EMCCD 器件因为采用电荷倍增技术,需要特殊设计的工艺来制备。

互补金属氧化物半导体 (CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 工艺是一种平面工艺,用 CMOS 工艺非常容易实现数字电路,而且 CMOS 数字电路的性能较高,理论上无静态功耗。除此之外,CMOS 工艺具有工艺简单的优点,所以随着数字处理电路的兴起 CMOS 工艺近年得到了较快的发展,成为微电子领域占主导地位的工艺。目前 CMOS 工艺的最小线宽已经跨入纳米量级,22 nm 工艺已经开始量产。用 CMOS 工艺可以在很小的芯片面积上集成大量的数字电路,完成强大的数字信号处理功能。

CMOS 图像传感器是图像传感器与 CMOS 电路的组合,它能够在单片芯片上集成图像传感器本身及相应的信号处理电路,完成复杂的光电信号处理功能,自 20 世纪 90 年代以来得到了飞速发展,随着 CMOS 工艺的不断发展和 CMOS 图像传感器的性能也在不断提高。

本文回顾了固体图像传感器的技术发展,探讨利用标准的 CMOS 工艺来实现低照度固体微光器件的可能性及技术路线。

1 CCD 与 CMOS 图像传感器

固体图像传感器是将投射到其光敏面的图像转变为与图像对应的电信号的一种功能性的半导体器件。图像传感器主要有两大部分组成:光电转换器件以及信号读出电路。

1.1 光电转换器件

光电转换器件的功能是将入射光子转换为电信号。光电二极管是最常用的光电转换器件,当光电二极管受光照时,输出光电流信号。如图 1 所示,当能量大于半导体材料禁带宽度的光子入射到 pn 结的结区时,入射光子的能量被吸收产生光生载流子,在 pn 结的自建电场作用下漂移,产生光电流 i_p 。光电二极管可以等效为一个电流源、二极管的寄生电容及漏电阻,如图 1 所示^[2]。

光电二极管的光电特性可以由响应率来衡量。响应率的定义为在一定入射光子功率的情况下光电二极管输出的光电流:

$$R = \frac{i_p}{p} = \frac{q \cdot \eta \cdot \lambda}{hc} \quad (1)$$

式中: q 为电子电量; η 为量子效率; λ 为入射光波长; c 为真空中光速; h 为普朗克常数。图 2 中蓝色的曲线给出了普通的硅光电二极管的光谱响应率,红色的直线为量子效率为 100% 的理想光电二极管的光谱响应率^[3]。

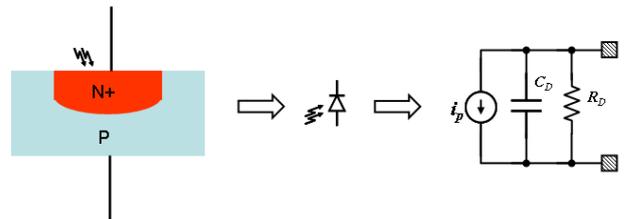


图 1 光电二极管及其等效电路

Fig.1 Photo Diode and its equivalent circuit

Responsivity (A/W)

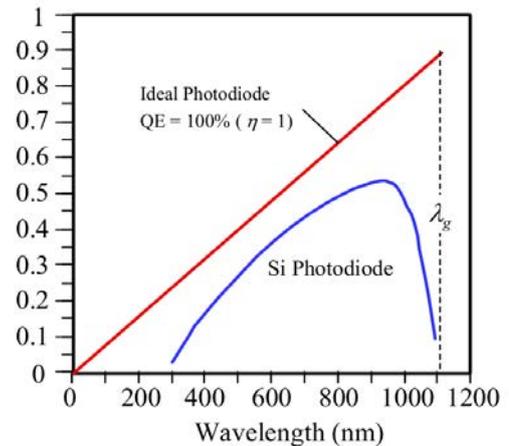


图 2 硅光电二极管的光谱响应

Fig.2 Spectrum response of the silicon photo diode

1.2 图像传感器

光电二极管完成了光到电的转换。为实现成像,必须将一系列的光电二极管制备成阵列,通过多路传输器进行电学扫描,将整个焦平面的各像元的光电信号以一定的次序读出供显示用。

光电二极管及其相关控制电路组成一个光电信号探测及处理单元,这样的每个单元称为像元,许多这样的像元排列组成阵列。信号读出电路中多路传输器将来自像元阵列的光电信号依次传输到输出端,以电学扫描的形式实现成像。最常用的多路传输器形式有:电荷耦合器件 (CCD),它利用一系列的转移势阱,将电荷传输到输出端; MOS 场效应

晶体管(MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)开关,利用一系列顺序接通的MOSFET开关,将探测元信号连接至输出总线。依据信号读出电路的不同,可以将固体图像传感器分为CCD及CMOS图像传感器两大类^[4]。

表征图像传感器性能的主要指标有:灵敏度、分辨率、填充因子、信噪比、固定图案噪声、动态范围及帧频等。

图像传感器的灵敏度定义为一定入射光子功率的情况下图像传感器输出的信号幅度。灵敏度与光电转换器件的响应率及感光面积有关。

图像传感器的分辨率决定了其分辨图像空间细节的能力,通常用像元数目来表示,如分辨率为1024×768的图像传感器由1024列、768行的像元阵列组成。

图像传感器的填充因子定义为感光面积与像元总面积之比。像元中除光电转换器件外,还有其他控制及读出器件,他们将占据一定的芯片面积,因此图像传感器的填充因子总是不大于100%的。如图3所示为一个像元版图,光电二极管的有效面积仅为左下角红框部分,填充因子仅为10%左右。

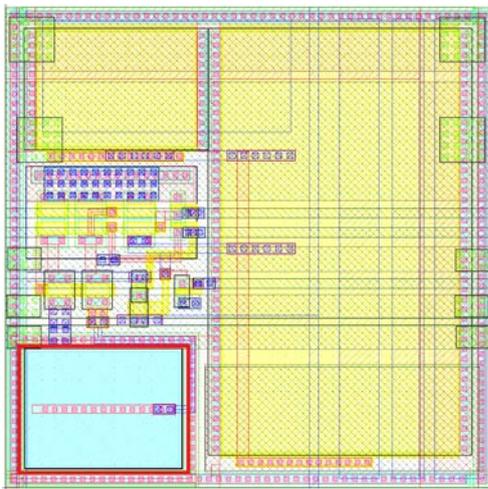


图3 图像传感器像元版图

Fig.3 Layout of an image sensor pixel

图像传感器的信噪比定义为其输出信号功率与噪声功率之比,通常用分贝值表示。图像传感器中有许多噪声源,其输出的噪声将污染图像信号。图像传感器的信噪比越高,则其输出图像的质量就越好。

图像传感器的固定图案噪声是由于图像传感器各像元间的光电性能的非均匀性导致的输出图像信号上存在的固定图案,其本质是一种空域噪声。

图像传感器的动态范围定义为所能感知的最大非饱和信号与最小可探测信号的比值,通常用分贝

值表示。图像传感器的动态范围表征了其处理大对比度图像信号的能力。

图像传感器的帧频定义为单位时间内其输出图像信号的帧数。图像传感器的帧频表征了其获取图像的速度,帧频越高,其获取高速运动图像的能力就越强。

1.3 CCD 图像传感器

CCD器件实质上是一种模拟移位寄存器。其原理是在时钟的控制下,将信号电荷由一个势阱转移到另一个势阱,从而实现模拟信号的移位转移。CCD图像传感器利用CCD器件的信号转移功能来实现电扫描。如图4所示为CCD图像传感器的工作示意图,信号的多路转换由垂直转移CCD器件及水平转移CCD器件两部分组成。在实际的CCD图像传感器中,光电转换器件与垂直CCD器件是集成在一起的。垂直CCD器件将每一行的光电二极管信号顺次转移到水平CCD器件上;而水平CCD器件将这一行信号转移到输出端。重复以上过程,形成一场图像信号。

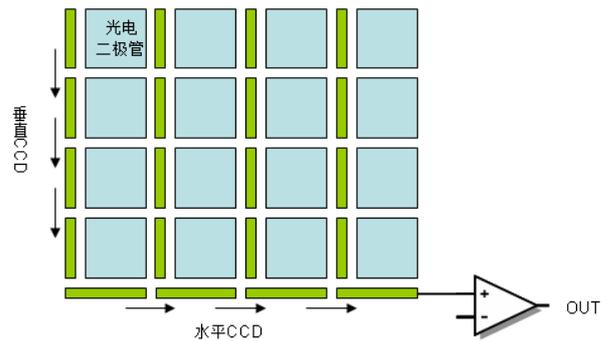


图4 CCD图像传感器原理

Fig.4 Principle of the CCD image sensor

1.4 CMOS 图像传感器

CMOS图像传感器光电信号的多路传输是利用晶体管开关来实现的,其信号传输是在电压或电流域进行的。

如图5所示,一个N型MOSFET当其栅极加上大于阈值电压的正电压 V_{GS} 时,栅极下面产生反型层,形成沟道联接源极和漏极,其沟道是导通的,源极和漏极间等效于一个阻值很小的线性电阻,相当于一个闭合的开关;当其栅极电压 V_{GS} 小于阈值电压时,栅极下面无反型层产生,没有沟道联接源极和漏极,源极和漏极间等效于一个阻值极大的电阻,相当于一个非闭合的开关。如果将NMOS晶体管和PMOS晶体管并联,加上不同的驱动信号,构成CMOS开关,可以大大减小其导通电阻和阻值的非线性。

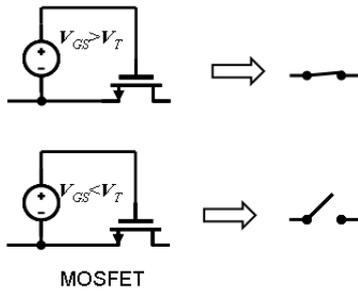


图 5 MOSFET 开关 Fig.5 MOSFET switch

CMOS 图像传感器采用 CMOS 开关来切换各光电二极管的信号,如图 6 所示,每一个像元由一个光电二极管和一个 CMOS 开关构成。当行驱动电路选中某一行时,此行像元输出信号的 CMOS 开关导通,其余行的 CMOS 开关不导通,此行像元的光电信号传输到列选多路器。列选多路器也是由一系列的 CMOS 开关构成,依次将此行的信号顺序联接输出端,完成一行信号的顺序读出。

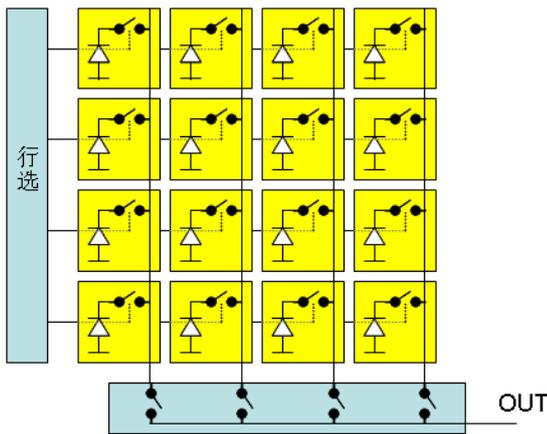


图 6 CMOS 图像传感器原理

Fig.6 Principle of the CMOS image sensor

1.5 CCD 与 CMOS 图像传感器的比较

由上面的介绍可以看出, CCD 图像传感器与 CMOS 图像传感器的光电转换原理是一致的,其本质区别在于光电信号的多路传输方式。下面分别介绍 CCD 图像传感器与 CMOS 图像传感器的优缺点。

CCD 图像传感器靠电荷转移进行信号的多路传输,光电信号的多路传输在电荷域进行,像元的光电信号产生及传输在同一器件内完成,填充因子可达到 80%~100%,像元面积利用率较高^[4]。同时,由于 CCD 图像传感器的电荷转移是无源的,电荷在转移时不会引入时域噪声,CCD 器件间的性能参数的离散也不会引入像元与像元间的性能离散,也即 CCD 图像传感器在传输过程中不会引入时域噪声及固定图案噪声。

CCD 图像传感器的最主要的缺点在于其信号在传输之前无法进行任何处理。CCD 图像传感器中

光电转换及多路传输是由同一个器件完成的,且信号传输是在电荷域进行的,其输入信号为光电二极管产生的存储在其结电容上的电荷,即光电信号在多路传输前不可能进行任何处理,这是 CCD 图像传感器的主要缺点之一。其次,CCD 图像传感器因为靠电荷转移进行信号的多路传输,并且只能实现相邻器件之间的电荷转移,其信号多路传输只能顺次进行,电荷转移的效率将影响信号传输的质量。面阵规格越大,电荷转移的级数就越多,电荷转移损失就越高。所以大面阵的 CCD 图像传感器要求具有极高的电荷转移效率。CCD 图像传感器中集成了 CCD 器件,其制备工艺较为复杂,成本较高。CCD 需要多相时钟驱动,需要相对较高的驱动电压及较高的驱动时钟频率,导致 CCD 图像传感器的功耗较高。

CMOS 图像传感器靠开关切换进行信号的多路传输,光电信号的多路传输在电压域或电流域进行。因为像元的光电信号产生及传输在不同器件内完成,信号在传输之前可以进行处理,这是 CMOS 图像传感器的最大的优势。另外,由于 CMOS 的像元寻址方式是非常灵活的,可以实现任意像元的读出。CMOS 图像传感器可以利用标准的 CMOS 工艺制备,工艺成熟,成本较低。同时可与大规模数字处理电路集成,实现片上图像处理功能,大大降低了系统成本,同时性能得到较大的提升。

CMOS 图像传感器的主要缺点在于在像元内部要集成开关晶体管,导致像元面积利用率不高,填充因子较小。表现为在同等像元尺寸下,CMOS 图像传感器的灵敏度比 CCD 图像传感器的低。同时,由于 CMOS 图像传感器的信号多路传输是由有源晶体管开关进行的,将引入时域噪声及固定图案噪声,降低输出图像信号的信噪比。

目前 CMOS 图像传感器凭借其成本、功耗及集成度的优势在消费电子市场已经占据主要地位。在高端图像传感器市场,CCD 图像传感器还占据性能的优势。随着 CMOS 图像传感器的性能不断提升,未来将向低照度、高动态及高速图像传感器领域扩张,占据微光、医疗、科学图像探测等高端市场。

2 先进 CMOS 图像传感器技术

随着 CMOS 工艺在超大规模集成电路领域的不断快速演进,CMOS 图像传感器技术得到了较快的发展。许多先进技术在 CMOS 图像传感器领域得以应用,极大地提高了 CMOS 图像传感器的性能。其中有源像元图像传感器 (APS: Active Pixel

Sensor) 及数字像元图像传感器 (DPS: Digital Pixel Sensor) 技术是两个里程碑式的进展。

2.1 CMOS 有源像元图像传感器

有源像元图像传感器是 CMOS 图像传感器发展史上的第一个重要进展, 其主要设计思想是在像元内部集成有源晶体管进行光电信号处理^[5]。早期因为 CMOS 工艺线宽的限制, 在数微米见方的像元内部只能集成一个光电二极管及一个开关晶体管, 完成图像传感器的最基本的光电转换及多路传输的功能。自 1990 年起, 随着 CMOS 工艺线宽的逐步缩小, 在像元内部可以集成更多的晶体管, 完成更多的信号处理功能。

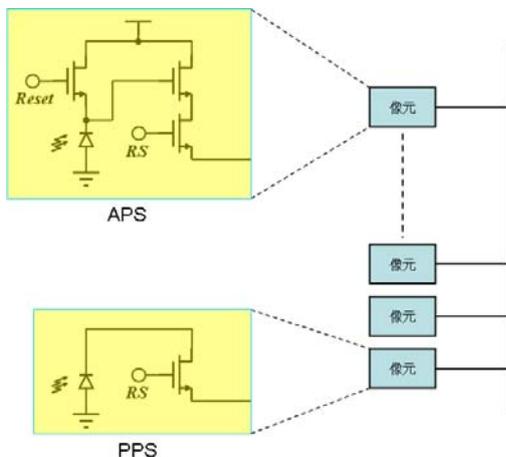


图 7 有源像元 (APS) 及无源像元 (PPS) CMOS 图像传感器

Fig.7 Active pixel (APS) and passive pixel (PPS) CMOS image sensor

如图 7 所示为有源像元图像传感器及无源像元图像传感器 (PPS: Passive Pixel Sensor) 的示意图。在 PPS 中, 光电二极管输出的光电流信号直接通过开关晶体管传输到列总线上, 在传输之前未经任何处理。而在 APS 中, 光电二极管产生的光电流在其分布电容上积分, 通过源极跟随器缓冲及开关晶体管后再传输到列总线上。通过光电流积分后, 光电信号的信噪比得到极大的增强, 同时经过缓冲后的电压信号更有利于多路传输。

APS 使像元内部的光电信号处理成为现实, 即 在多路传输之前可以对光电信号进行变换、积分、放大、相关采样及缓冲驱动等处理, 极大地提高了 CMOS 图像传感器的性能^[6]。而 CCD 图像传感器由于其器件结构所限, 在多路传输之前无法进行任何信号处理。这一点是 CMOS 图像传感器与 CCD 图像传感器的最基本的区别。

2.2 数字 CMOS 图像传感器

在图像传感器片内将光电信号数字化是图像传

感器的发展方向^[7]。与模拟图像传感器相比, 数字图像传感器具有多项优势, 如减少对模拟信号传输的干扰、集成数字图像处理电路、提高数据传输速度、降低图像系统复杂度及成本等^[8]。随着 CMOS 工艺的线宽不断缩小, 在 CMOS 图像传感器片内、乃至像元内集成模拟-数字转换器 (ADC) 将光电信号数字化成为可能。

图 8 为常见的列级 ADC 结构的数字图像传感器结构框图。在该结构中, 每一列像元的信号通过一个 ADC 来进行量化, 行多路传输在模拟域进行, 而列多路传输在数字域进行。与模拟图像传感器相比, 数字图像传感器将 ADC 集成到片内, 不可避免地带来功耗的上升, 因而对 ADC 功耗的要求成为首要考虑。其次, 要在图像传感器片内集成 ADC, 由于受像元尺寸等因素的限制, 对 ADC 芯片面积也提出要求。

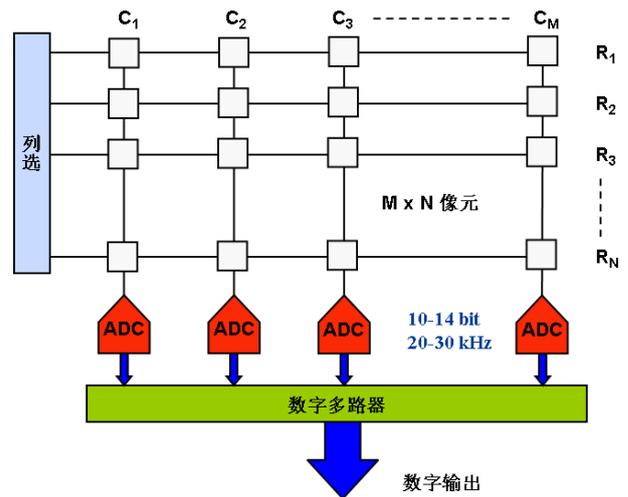


图 8 列级 ADC 结构数字图像传感器电路框图

Fig.8 Block diagram of column-level ADC digital image sensor

图 9 给出了不同结构的 CMOS ADC 的速度及分辨率的关系。对于数字图像传感器来说, 其动态范围要求 ADC 的量化位数在 10~14 bit 之间。适合数字图像传感器的 ADC 结构有流水线 ADC (Pipelined ADC)、逐次逼近型 ADC (SAR ADC) 及 Sigma-Delta ADC 3 种。

2.3 数字像元 CMOS 图像传感器

将 ADC 集成进入像元内部就构成像元级 ADC 结构的数字图像传感器, 即数字像元图像传感器 (DPS), 结构见图 10。每一个像元由一个 ADC 来进行模数转换。像元电路工作在模拟域及数字域, 列多路传输器及行多路传输器工作在数字域。DPS 的主要困难是在非常小的像元面积内实现光电转换

及 ADC 的功能,要求 ADC 具有较小的面积及较低的功耗。首个 DPS 于 1994 年实现^[9],其采用的是几个像元共用一个 ADC 的方式^[10]。文献^[11]提出了一种利用光-频率转换器实现的像元内 ADC 的图像传感器方案,文献^[12]利用相同原理在 $23\mu\text{m}\times 23\mu\text{m}$ 像元面积内集成了 ADC 及数据锁存器,图像传感器的动态范围达到 130 dB。

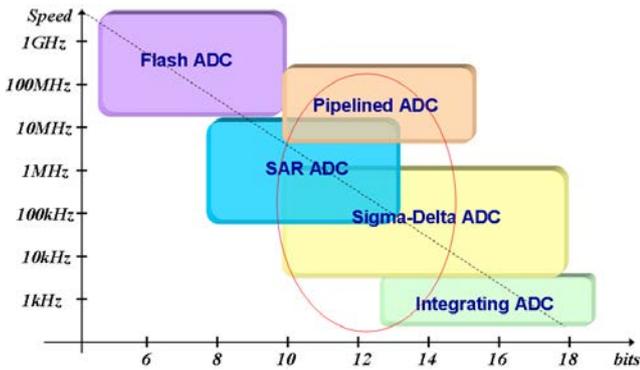


图 9 ADC 的速度与分辨率

Fig.9 Speed and resolution relationship of different ADCs

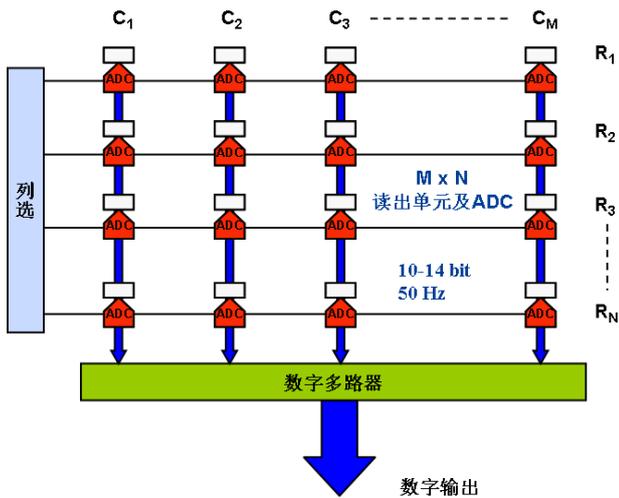


图 10 像元级 ADC 结构数字图像传感器电路框图

Fig.10 Block diagram of the pixel-level ADC digital image sensor

DPS 的主要优点在于光电信号的多路传输全部在数字域进行,抗干扰能力强,解决了 CMOS 图像传感器信号多路传输过程中引入的时域噪声及固定图案噪声问题。随着 CMOS 工艺技术的不断演进,器件最小线宽的不断缩小,DPS 在像元内可以集成更多的处理功能,传输速率将进一步增加,功耗将进一步降低,是未来 CMOS 图像传感器发展的重要方向。

3 低照度数字 CMOS 图像传感器技术

利用 CMOS 图像传感器在像元内处理信号的优势,结合像元内信号放大及低噪声读出技术等一

系列技术措施,将 CMOS 图像传感器的灵敏度提高,使其在低照度下保持良好的性能,称为低照度 CMOS 图像传感器。低照度 CMOS 图像传感器是除 EBCCD 及 EMCCD 器件外的一种新型固体微光器件。目前低照度 CMOS 图像传感器的微光性能还无法与其他固体微光器件相比,主要表现为灵敏度较低。下面以提高低照度 CMOS 图像传感器灵敏度为目的,介绍几种专项技术。

3.1 光电二极管灵敏度增强技术

灵敏度是低照度图像传感器应用的主要参数,而决定低照度图像传感器性能的主要因素是图像传感器的灵敏度。光电二极管的灵敏度由量子效率及光敏面的面积等决定。由于可见光中波长较长的部分具有较深的穿透深度,加深光电二极管的结区将有助于长波部分光子的吸收,产生更强的光电流信号。图 11 所示为深结区光电二极管的示意图,其光谱响应曲线见图 12^[13],与通常的光电二极管相比,深结区光电二极管的量子效率提高了近 20%。

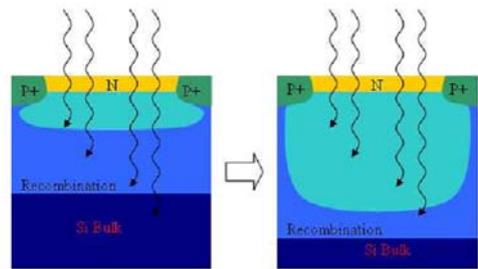


图 11 深结区光电二极管

Fig.11 Deep depletion photo diode

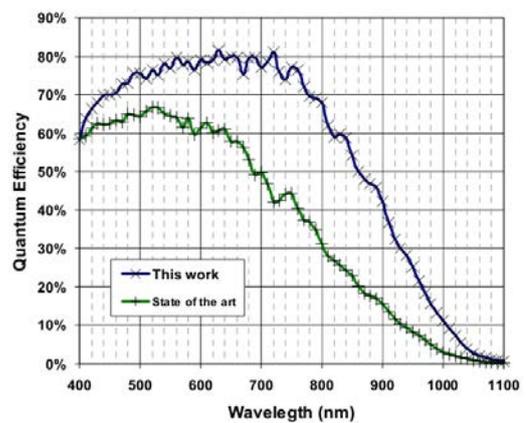


图 12 深结光电二极管光谱响应曲线

Fig.12 Spectrum response of the deep depletion photo diode

3.2 像元面积优化技术

CMOS 图像传感器的灵敏度与像元中感光面积的大小相关,为提高低照度下图像传感器的性能,提高像元面积是一个直接的方法。文献报道目前最大的像元尺寸达到 $160\mu\text{m}\times 160\mu\text{m}$ 像元面积,在

0.1 lx 照度下以 50 帧的帧频清晰成像^[14]。增大像元面积带来的结果是芯片面积及光学系统尺寸的增大, 导致成本上升。根据具体的应用条件, 优化设计像元尺寸, 可以以较小的成本达到所需的性能。

3.3 微透镜及微光楔技术

CMOS 图像传感器像元中集成了更多的信号处理及多路功能, 其结果是图像传感器的填充因子不断下降, 通常在 30% 左右。针对 CMOS 图像传感器填充因子不高的缺陷, 在每个像元上方通过工艺制备一个微透镜, 将入射光能量聚焦于光电转换器的光敏面上, 提高图像传感器的灵敏度, 见图 13。

微透镜可以通过光刻胶热融^[15]或其他工艺方式实现。微透镜技术有效提高了 CMOS 图像传感器的填充因子。由于微透镜表面的反射与透射损失, 微透镜技术能将图像传感器的等效填充因子提高到 70% 左右。

与微透镜技术相比, 微光楔技术能更有效地提高图像传感器的填充因子^[16]。微光楔的示意图见图 14。与微透镜的折射方式不同, 微光楔工作于反射方式, 在像元面积内的入射光线被高反射率的微光楔表面反射进入光电二极管的有效光敏面, 极大地提高了入射光线利用率。采用高反射率材料在微光楔表面镀膜, 可以将图像传感器的等效填充因子提高到接近 100%。

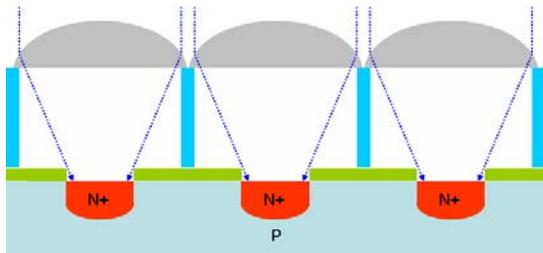


图 13 微透镜示意图 Fig.13 Microlenses

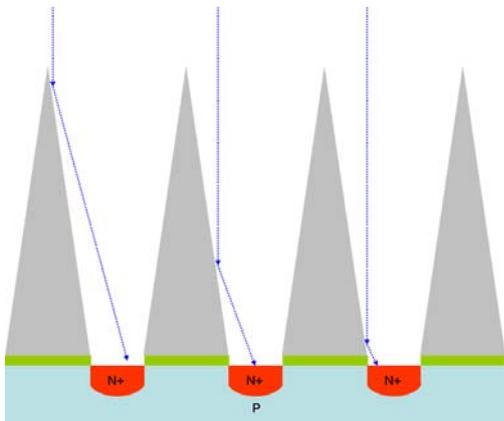


图 14 微光楔示意图 Fig.14 Micro optical wedges

3.4 长时间积分技术

CMOS 图像传感器的最大优点是可以在像元内进行光电信号处理。光电流积分是有效利用帧时间

来提高输出信号幅度及信噪比的最好方法。如图 15 所示为光电流积分电路示意图。

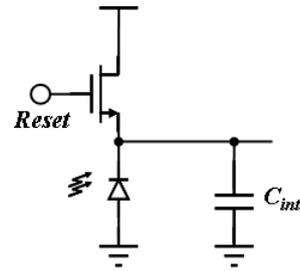


图 15 光电流积分电路

Fig.15 Photo current integration circuit

光电流积分后输出的信号电压由下式给出:

$$v_p = \frac{I_p \cdot T_{int}}{C_{int}} \quad (2)$$

式中: I_p 为光电流; T_{int} 为积分时间; v_p 为像元的输出电压。由上式可以看出, 增长积分时间可以提高输出信号的幅度, 同时也可以提高信噪比。例如图像传感器的帧频为 50 Hz, 则其帧时间为 20 ms, 包括积分时间与读出时间。如果将读出时间控制在 100 μ s 内, 则积分时间可以高达 19.9 ms。尽量将读出时间缩短, 增长积分时间是提高图像传感器灵敏度的有效方法^[17]。

3.5 低噪声技术

以上几种技术着眼于提高 CMOS 图像传感器的输出信号幅度。本技术旨在降低 CMOS 图像传感器的噪声, 提高信噪比。

CMOS 图像传感器的读出噪声较大, 通过对像元工作方式的分析, 优化设计电路, 可以降低像元噪声及读出噪声^[13,17-18]。对于低照度图像传感器, 光电二极管端的直流电平具有更高的灵敏度^[19-20], 文献中提出一种新的读出方式, 在低照度情况下具有更高的灵敏度。像元内放大是降低传感器噪声的一种手段, 通常的 CMOS 图像传感器像元内采用源极跟随器, 电压增益小于 1, 读出晶体管的噪声达到了传感器的噪声水平。采用放大器的优点是读出晶体管的噪声被电路增益所抑制, 能够达到亚电子数的读出噪声水平^[21]。

采用列级信号处理是降低 CMOS 图像传感器时域噪声的较佳选择。采用高增益列级放大器及多重相关采样技术可以有效的提高 CMOS 图像传感器的输出信号信噪比^[22-23]。2012 年采用此技术的 CMOS 图像传感器在 0.06 lx 的照度条件下得到了清晰的成像^[24]。

3.6 高动态范围 ADC 技术

采用列级高动态范围 ADC 是实现列级数字信

号处理的基础。高动态范围 ADC 具有较低的量化噪声,保证了在低照度情况下系统的信噪比,有利于在数字域进行信号处理。同时,较高的动态范围保证在大信号条件下不会产生饱和。2011 年报道的采用 19 bit 高精度列级 ADC 结构的 CMOS 图像传感器,结合数字增益控制功能,达到了 82 dB 的动态范围,在 0.005 lx 的照度条件下得到了 1024×1032 的高清图像^[25-26]。

以上介绍了提高 CMOS 图像传感器灵敏度的几个技术途径。综合采用以上技术,结合数字图像处理技术的应用,有望在不远的将来,将低照度 CMOS 图像传感器的灵敏度提高到 0.001 lx 的水平,达到实用化的水平。

4 结论

低成本、低功耗、小体积的固体微光器件是未来发展的方向,当前固体微光器件以 EBCCD 及 EMCCD 器件为主。随着 CMOS 工艺及电路设计技术的发展,低照度 CMOS 图像传感器的性能在不断提高。通过采用专项技术,低照度 CMOS 图像传感器的性能已接近 EMCCD 的性能,揭开了 CMOS 图像传感器在微光领域应用的序幕。随着对低照度 CMOS 图像传感器研究的进一步深入,在不远的未来,低照度 CMOS 图像传感器的性能将达到夜视应用要求,在微光器件领域占据重要地位。

参考文献:

[1] 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

[2] Weckler J P. Operation of pn junction photo detectors on a photon flux integration mode[J]. *IEEE Solid-State Circuits*, 1967, **2**(3): 65-73.

[3] Kasap S O. *Optoelectronics & Photonics: Principles & Practices*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

[4] 米本和也. **CCD/CMOS 图像传感器基础与应用**[M]. 北京:科学出版社,2006.

[5] Noble P. Self-scanned Image Detector Arrays[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1968, **15**: 202-209.

[6] Fossum E R. Active pixel sensors: are CCD's dinosaurs?[C]//*Proc. SPIE, Charge-Coupled Devices and Solid-State Optical Sensors III*, 1993, **1900**: 2-14.

[7] Yadid-Pecht O. *Etienn-cummings R. CMOS imagers*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.

[8] Gamal A El, Eltoukhy H. CMOS image sensors[J]. *IEEE Circuits & Device Magazine*, 2005, **21**: 6-20.

[9] Fowler B., Gamal A. E, Yang D.X.D. A CMOS area image sensor with pixel-level A/D conversion[C]//*Tech. Dig. IEEE Int. Solid-State Circuits*, 1994: 226-227.

[10] Yang D X D, Gamal A E, Fowler B et al. A 640×512 CMOS image sensor with ultrawide dynamic range floating-point pixel-Level

ADC[J]. *IEEE Solid-State Circuits*, 1999, **34**(12): 1821-1834.

[11] Graaf G, Wolffenbuttel R F. Light-to-frequency converter using integrating mode photodiodes[J]. *IEEE Tran. Instrum. Meas.*, 1997, **46**(4): 933-936.

[12] Wang X, Wong W, Hornsey R. A high dynamic range CMOS image sensor with in pixel light-to-frequency conversion[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2006, **53**(12): 2988-2992.

[13] Fereyre P et al. L² CMOS image sensor for low light vision[C]//*Proc. International Image Sensor Workshop*, 2011.

[14] Takahashi H, et al. A 300 mm wafer-size CMOS image sensor for low-light-level imaging[C]//*Proc. International Image Sensor Workshop*, 2011.

[15] Popovic Z D, Sprague R A, Connell G A. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(7): 1281-1284.

[16] Wang Y, Fossum E R. Light-sensing array with wedge-like reflective optical concentrators: U.S. Patent 5952645[P]. 1999-9-14.

[17] Degerli Y. Analysis and Reduction of Signal Readout Circuitry Temporal Noise in CMOS Image Sensors for Low-Light Levels[J] *IEEE Trans. Electron Devices*, 2000, **47**(5): 949-962.

[18] Kawahito S, Itoh S. Noise calculation model and analysis of high-gain readout circuits for CMOS image sensors[C]//*Electronic Imaging 2008. International Society for Optics and Photonics*, 2008: 68160D-9.

[19] Faramarzpour N, et al. An approach to improve the signal-to-noise ratio of active pixel sensor for low-light-level applications [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2006, **53**: 2384-2391.

[20] Faramarzpour N, et al. CMOS-based active pixel for low-light-level detection: analysis and measurements [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2007, **54**: 3229-3237.

[21] Lotto C, Seitz P, Baechler T. A sub-electron readout noise CMOS image sensor with pixel-level open-loop voltage amplification [C]//*Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, 2011 *IEEE International. IEEE*, 2011: 402-404.

[22] Chen Y, Xu Y, Mierop A J, et al. Column-parallel digital correlated multiple sampling for low-noise CMOS image sensors[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2012, **12**(4): 793-799.

[23] Kawahito S, Suh S, Shirei T, et al. Noise reduction effects of column-parallel correlated multiple sampling and source-follower driving current switching for CMOS image sensors[C]//*Proc. Int. Image Sensor Workshop*. 2009.

[24] Chen Y, Xu Y, Chae Y, et al. A 0.7 e⁻ rms-temporal-readout-noise CMOS image sensor for low-light-level imaging[C]//*Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, 2012 *IEEE International. IEEE*, 2012: 384-386.

[25] Seo M W, Suh S, Iida T, et al. An 80 μV rms-temporal-noise 82dB-dynamic-range CMOS image sensor with a 13-to-19b variable-resolution column-parallel folding-integration/cyclic ADC[C] //*Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, 2011 *IEEE International. IEEE*, 2011: 400-402.

[26] Seo M W, Suh S H, Iida T, et al. A low-noise high intrascene dynamic range CMOS image sensor with a 13 to 19b variable-resolution column-parallel folding-integration/cyclic ADC[J]. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 2012, **47**(1): 272-283.