

CMOS 器件光学特性的测量

宋 敏¹ 郑亚茹² 卢永军¹ 曲艳玲¹ 宋利民³

(1 大连民族学院光电子技术研究所, 大连 116600)

(2 辽宁师范大学物理系, 大连 116029)

(3 大连海事大学信息工程学院, 大连 116023)

摘要: 介绍了一种测量 CMOS 像感器调制传递函数(modulation transfer function, MTF)的方法,分别构造了可用于 MTF 和光谱量子效率测量的实验系统.并利用上述实验系统对 1024 ×1024 的 CMOS 像感器的 MTF 和量子效率进行了测量,获得了令人满意的结果.

关键词: CMOS; 调制传递函数; 量子效率

PACC: 0760D; 0765G; 4270G

中图分类号: TN386.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)12-2407-04

1 引言

由于电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)可以在较大面积上非常有效、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 技术一直是可见光子探测和图像捕获的主要技术,许多微光学系统都离不开 CCD,其主要用于 200~1100nm 波长范围内的精确采集一维和二维光分布^[1].但是最近 10 年,随着可以用工业标准制造的 CMOS 像感器件的出现,光学测量技术的新纪元已经到来.由于 CMOS 像感器具有诸如像元内放大、列并行结构以及深亚微米 CMOS 处理等独特的优点,使得 CMOS 在几个应用领域成为首选探测器.到 20 世纪 80 年代末期,继 CMOS 多路开关取代 CCD 用于红外焦平面阵列的数据读出之后,不仅在低成本成像市场,而且在许多高性能的应用如高端静态数字照相机、高清晰度电视以及精密测量^[2~5]等方面,CMOS 像感器都有了长足的发展.与通常 CCD 像感元件不同,对于 CMOS 像感器而言,在一个芯片甚至在每个像元上都可以实现模拟和数字电路的功能.这样,不仅可以以新颖的、最优化的方法完成已有的光学测量方法,而且也可以用所谓的“智能像元”实现新的测量方法.因此用于可见光

子探测的器件已经从 CCD 转向 CMOS 像感器.

近年来,对 CCD 光学特性研究以及特性参数的测量方法研究已经开展了大量的工作^[6~10],但对 CMOS 器件在该方面的研究却略显不足.本文以 1024 ×1024 CMOS 器件为例,对 CMOS 器件的光学特性如调制传递函数、量子效率等参数进行了测量.

2 调制传递函数的测量

长期以来,调制传递函数(modulation transfer function, MTF)一直是评价探测(或成像)系统质量的重要指标,因为它能够定量地描述探测(成像)系统探测在频率域光变化的能力,亦即空间分辨率.此外,对于一个由几个子系统组成的系统而言,其总的 MTF 等于各子系统的 MTF 的乘积,这是其他评价方法无法比拟的另一个优点.迄今为止,人们已经提出了诸如刃边法、激光散斑法、扩展频率孔径法等多种测量离散成像器件 MTF 的方法.不过这些方法基本上可以归为两类,一类是利用固定靶(如标准正弦图样、点光源或刃边)测量 MTF,这类方法的主要不足是将靶函数引入探测器像面必须借助光学成像系统,因而光学系统的成像质量直接影响到测量结果.而另一类是利用随机靶(如激光散斑)测量

宋 敏 女,1962 年出生,博士,教授,主要研究方向为成像与图像处理技术和光电检测技术.

2005-05-17 收到,2005-07-06 定稿

MTF,这类方法略好于固定靶的方法,但仍存在相干噪声大、数据处理复杂、衍射孔径的质量对测量结果有直接影响等不足.对此,我们利用频率连续可变的正弦光栅来测量 CMOS 器件的 MTF.与以往的方法相比,这种方法的主要优点是:靶函数的空间频率在 $0 \sim 300\text{lp/mm}$ (线对/毫米) 之间连续可变;将靶函数引入待测的 CMOS 上无须借助任何光学系统.

2.1 CMOS 器件 MTF 的基本原理

假定 CMOS 器件的有效像元宽度为 a ,在 CMOS 采样过程中,落到每个像元的光强全部被整个像元接收,因此,每个像元所接收到的光强应该对输入函数从 $x - a/2$ 到 $x + a/2$ 取积分获得,其中 x 是像元中心位置,是输入函数与采样函数的相对位置.由于在本项研究中,我们选用正弦函数为输入函数,因此 $f(x)$ 可以表示为:

$$f(x) = 1 + A_1 \cos(2\pi x) \quad (1)$$

式中 $2\pi x$ 是正弦函数的空间频率.因此,CMOS 阵列的输出可以表示为:

$$g(x) = \frac{1}{a} \int_{x-a/2}^{x+a/2} (1 + A_1 \cos 2\pi x) dx \\ = 1 + A_1 \cos 2\pi (x - a/2) \text{sinc}(\pi a) \quad (2)$$

从(2)式可以看出:当输入函数是正弦函数时,CMOS 输出函数仍为正弦函数,只是由于输入函数与采样函数之间存在位相,致使输出函数的幅值有一定的衰减.因此,我们可以根据 MTF 的定义来确定 CMOS 器件的 MTF 为:

$$\text{MTF}(f) = \frac{C(f)}{C_0(f)}$$

式中 $C(f)$ 和 $C_0(f)$ 分别为输出函数与输入函数的调制对比度,而 CMOS 的调制对比度为

$$C = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}} \quad (3)$$

式中 S_{\max} 和 S_{\min} 分别为相邻像元输出的最大值与最小值,这些值既可以直接测量获得,也可以通过 CMOS 器件衬底内的扩散电流和耗尽区内的漂移电流计算得出^[9].

2.2 MTF 的测量

用于测量 CMOS 器件 MTF 的装置如图 1 所示.用一个 2.5mW 的 He-Ne 激光器 ($\lambda = 632.8\text{nm}$) 做光源,光源发出的光经扩束后成为直径为 50mm

的平行光,直接照射到由步进电机驱动的平面反射镜和立方棱镜 CBS 上,CBS 是一个用于分束的半透半反镜.分别由反射镜和半透半反镜射出的两束平行光发生干涉形成正弦图样,正弦图样的空间频率由两束相干光的夹角决定,转动平面反射镜就可以使正弦图样的空间频率在 $0 \sim 300\text{lp/mm}$ 之间连续变化.在测量 CMOS 器件的 MTF 时,将获得的正弦图样作为靶函数直接投射到待测的 CMOS 上,CMOS 器件采得的数据由数据采集与处理系统进行处理,该系统由数据采集卡、计算机和数据处理软件系统组成,它具有如下功能:(1)控制 CMOS 的数据采集参数;(2)显示采集结果;(3)对采得的数据进行累加、平滑、去背景噪声等处理,计算正弦光栅图样的空间频率;(4)根据需要计算 MTF 值并作出 MTF 曲线.

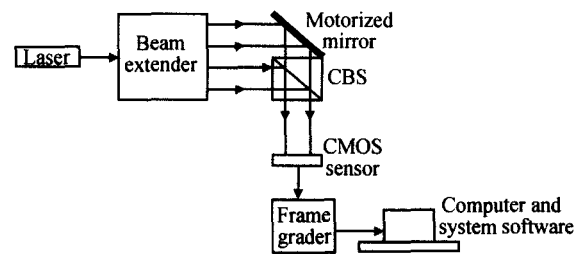


图 1 MTF 测量装置图

Fig. 1 MTF measurement setup

我们选取 1024×1024 的 CMOS 器件 (像元尺寸为 $10.5\mu\text{m}$) 用于实验.按照采样定理,该器件的截止频率 (即 Nyquist 频率) 应该是 47.6lp/mm .当入射的正弦图样的空间频率超过 47.6lp/mm 时,就会发生频谱混叠 (aliasing) 现象.因此,我们在测量过程中将空间频率变化的范围选定在 $0 \sim 50\text{lp/mm}$ 之间.通过反复实验发现该实验系统的主要误差来源是:由于激光光源起伏使所获得的正弦光栅图样存在背景噪声和毛刺,因此使得在相同情况下测得的空间频率和 MTF 值有偏差.为消除上述影响,除利用软件系统对采得的数据进行累加、平滑、去背景噪声等处理外,在相同情况下所获得的空间频率和 MTF 值都是多次测量 (3 次或 5 次) 取平均值的结果.图 2 给出了 3 次测量取平均值的结果,图 2(a) 和 (b) 分别对应水平和竖直方向的测量结果.从图中可以看出:由于像元几何形状的影响,使得水平和竖直方向上的测量结果略有差异.

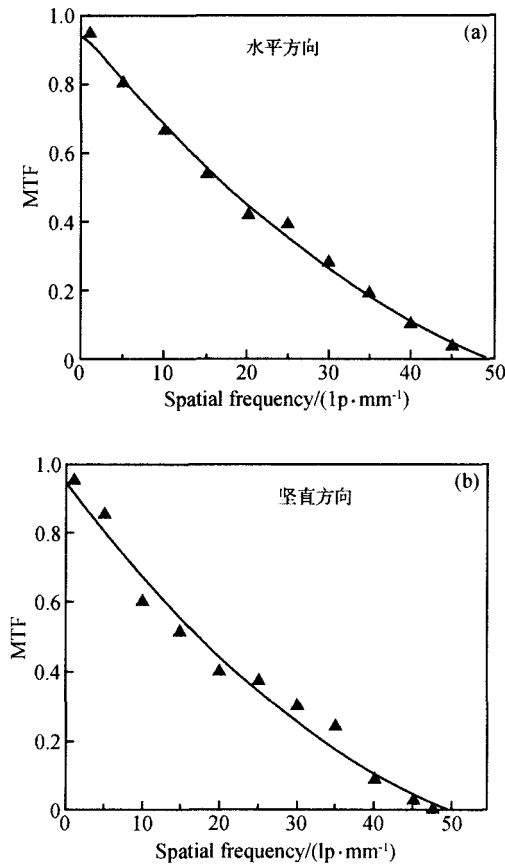


图 2 像元尺寸为 10.5 μm 的 CMOS 器件 MTF 测量结果
Fig. 2 MTF results for a CMOS image sensor with a pixel pitch of 10.5 μm

3 量子效率的测量

对于像感器件而言,量子效率 (quantum efficiency, QE) 是另一个重要参数. 因此我们又构造了另一个实验系统用于测量 CMOS 器件的量子效率. 该系统由一个卤素灯、一台光栅单色仪和一个积分球组成. 为了测量 CMOS 器件的量子效率,使由积分球提供光谱输入的光栅单色仪发出的均匀光谱可调的出射光直接照射到待测的 CMOS 像传感器上. CMOS 与单色仪出射狭缝之间的距离要选择适当,以保证充满探测器有效面积的辐射每边不超过整个面积的 50%. 为保证测量所需的信噪比 (SNR) 和光谱带宽,要对单色仪的入射、出射狭缝进行匹配选择,实验中我们选择在 390 ~ 1100nm 范围内光谱带宽为 5nm,单色仪步进间隔为 10nm. 为了获得 CMOS 的光谱量子效率,将 Bayer pattern 红、绿、蓝滤色片用于量子效率测量,对应三种颜色的绝对量子效率的测量结果如图 3 所示.

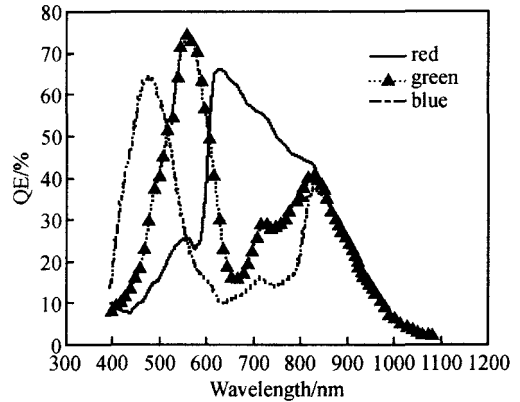


图 3 CMOS 像传感器的光谱量子效率
Fig. 3 Spectral quantum efficiency of a CMOS image sensor

4 结论

我们提出了一种用于测量 CMOS 器件 MTF 的方法,与以往的方法相比,这种方法的主要优点是:(1)靶函数(正弦光栅)的空间频率在 0 ~ 300lp/mm 之间连续可变,因此使测量的 MTF 曲线更准确;(2)由于采用的靶函数为正弦函数,因此数据处理非常简单,从而大大提高测量速度;(3)将靶函数引入待测的 CMOS 上无须借助任何光学系统,因而消除了光学系统成像质量对测量结果的影响,实现了真正意义上的器件特性测量. 同时我们还利用积分球测量了 CMOS 器件的光谱量子效率. 这些测量方法和测量装置不仅可以用于 CMOS 器件的测量,也可以用于其他线阵和面阵光电探测器相关参数的测量.

参考文献

- [1] Seitz P. Solid-state image sensing. In: Handbook of computer vision and application. Vol 1. New York: Academic Press, 2000:165
- [2] Helmers H, Schellenberg M. CMOS versus CCD sensors in speckle interferometry. Opt Laser Tech, 2003, 35:587
- [3] Pryddercha M L, Walthama N J, Turchetta R, et al. A 512 × 512 CMOS monolithic active pixel sensor with integrated ADCs for space science. Nucl Instrum Methods A, 2003, 512: 358
- [4] Graaf G, Wolffenbuttel R F. Smart optical sensor system in CMOS for measuring light intensity and color. Sensors and Actuators A, 1998, 67:115
- [5] Graaf G, Wolffenbuttel R F. Optical CMOS sensor system for

- detection of light sources. *Sensors and Actuators A*, 2004, 110:77
- [6] Docharn A D, Boreman G D. Holographic elements for modulation transfer function testing of detector arrays. *Opt Eng*, 1995, 34(8):2455
- [7] Astar W. New power-efficient optical filter for detector array modulation transfer function measurement by laser speckle. *Opt Eng*, 1996, 35(9):2761
- [8] Hu J S, Song M, Sun Y, et al. Measurement of modulation transfer function of charge-couple devices using frequency-variable sine grating patterns. *Opt Eng*, 1999, 38(7):1200
- [9] Campos J. Radiometric calibration of charge-coupled-device video cameras. *Metrologia*, 2000, 37(5):459
- [10] Song Min, Zhang Ying, Gui Xinkai, et al. Influence of carrier diffusion on modulation transfer function of charge coupled devices. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(3):311 (in Chinese) [宋敏, 张颖, 郜新凯, 等. 载流子扩散对电荷耦合器件传递函数的影响. *半导体学报*, 2004, 25(3):311]

Measurements of Optical Characterization for CMOS

Song Min¹, Zheng Yaru², Lu Yongjun¹, Qu Yanling¹, and Song Limin³

(1 *Institute of Optoelectronic Technology, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China*)

(2 *Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China*)

(3 *College of Information Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116023, China*)

Abstract: A new method is introduced for measuring the modulation transfer function (MTF) of CMOS imaging sensors. Experimental arrangements are constructed for the measurement of the MTF and quantum efficiency of CMOS. The MTF and quantum efficiency of a 1024 × 1024 CMOS imaging sensor are measured, and the results are satisfactory.

Key words: CMOS; modulation transfer function; quantum efficiency

PACC: 0760D; 0765G; 4270G

Article ID: 0253-4177(2005)12-2407-04

Song Min female, was born in 1962, PhD, professor. Her research interest includes image forming, image processing, and opto-electric detecting.

Received 17 May 2005, revised manuscript received 6 July 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics