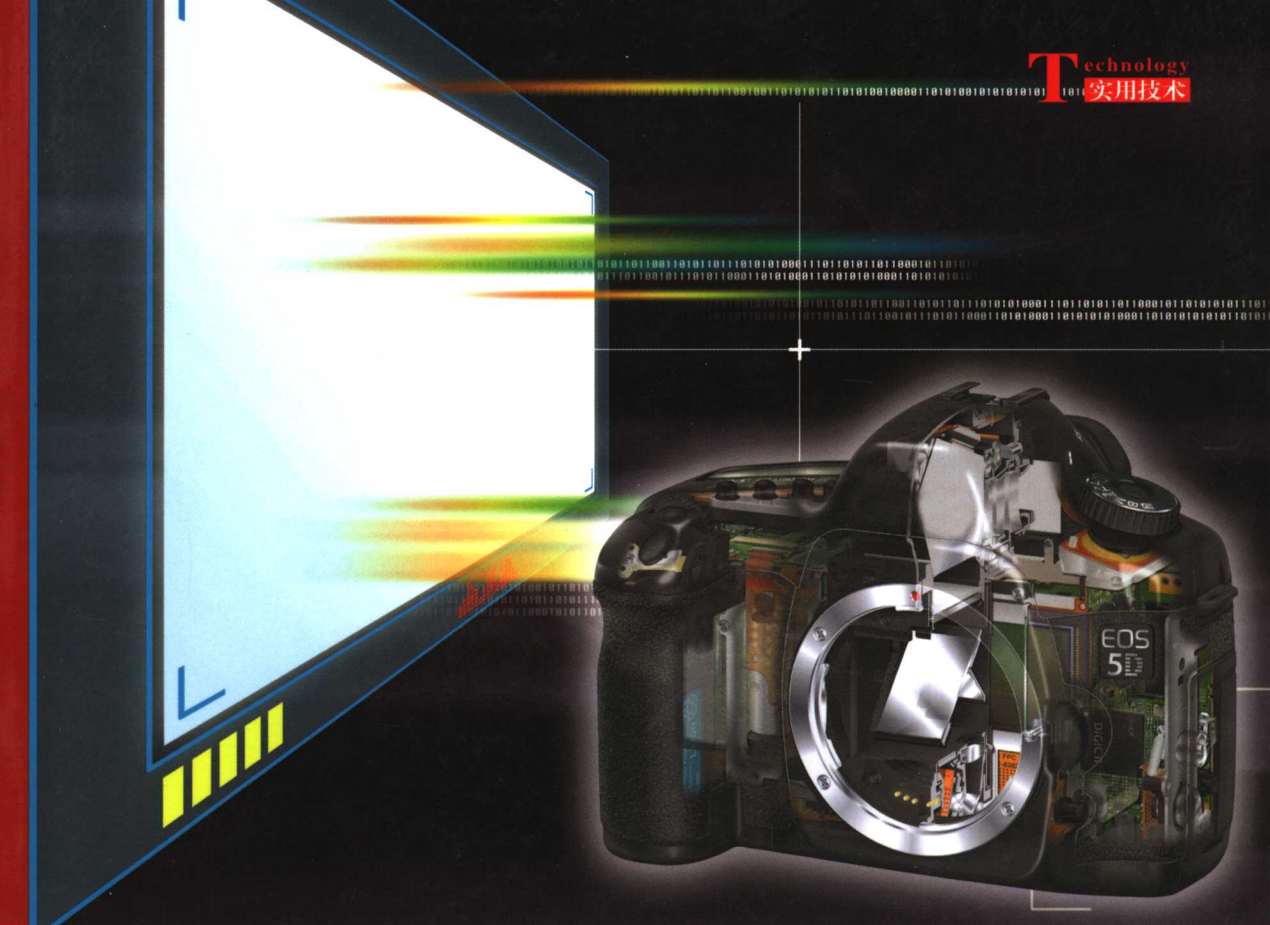




CCD/CMOS 图像传感器 基础与应用

〔日〕米本和也 著

陈榕庭 彭美桂 译

崔 凯 校

 科学出版社
www.sciencep.com

CCD/CMOS 图像传感器 基础与应用

〔日〕米本和也 著

陈榕庭 彭美桂 译

崔 凯 校



科学出版社

北 京

图字: 01-2006-3703 号

内 容 简 介

CCD 图像传感器和 CMOS 图像传感器,最初主要应用于数字照相机和数字摄像机等,但近几年以惊人的速度广泛应用于手机、个人计算机及 PDA 等小型装置。

本书从 CCD 图像传感器的基本工作原理出发,利用丰富的插图,简明易懂地介绍 CCD 图像传感器的各种构造及工作方式、各种特性和应用技术等。另外,也对随着片上系统的研发成功在广泛领域期待应用的 CMOS 图像传感器,如特征与技术、片上系统等进行详细介绍。

本书可供图像传感器相关领域的工程技术人员、研发和设计人员,以及大专院校相关专业的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

CCD/CMOS 图像传感器基础与应用/(日)米本和也著;陈榕庭,彭美桂译;崔凯校. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017728-2

I. C… II. ①米…②陈…③彭…④崔… III. 图像处理-传感器-图解 IV. TP212-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 083989 号

责任编辑:崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 9 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 9 月第一次印刷 印张: 15 1/2

印数: 1—4 000 字数: 231 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前言

大家是否想过,平常我们所收看的电视节目,其中的图像是如何播放出来的?众所周知,电视节目是将用摄影机拍下人眼看见的世界转换成电信号后,再以电视机的显像管播放出来的。在摄影机中,扮演人眼视网膜角色的就是不可缺少的图像传感器。

回顾电视机的历史,最早诞生的图像传感器是属于真空管之一的摄像管。它被固态摄影元件——CCD 图像传感器取代之前,有很长一段时间内担任输入图像的重要元件而活跃起来。虽然现在,摄像管仍应用于某些特殊场合,不过现在的摄影机,几乎全部使用 CCD 图像传感器。近年来,取代传统胶卷照相机的数字照相机,普遍存在于我们的日常生活中。在数字照相机中,小型且可提供高画质图像的元件,正是 CCD 图像传感器和 CMOS 图像传感器。

图像传感器虽是照相机中的关键元件,但相关的专业书籍却是甚少。诸多前辈已出版的专业书籍简单易懂且说明详尽,对于专家而言相当有用,可谓不可或缺的专业书;但本书则面向 CCD 图像传感器与 CMOS 图像传感器的初学者,从基础到应用以图解形式进行解说,便于读者理解各项原理。

本书特点之一是附录部分,其中列出了即使是专门研究图像传感器的研究人员还是应用技术人员,平常很少使用且容易忘记的项目。为了定量地理解,包括推导过程等利用公式加以解说。内容方面,以图像传感器的基础为主线,穿插介绍关于照相机方面不可或缺的图像传感器特有的信号处理技术。

此外,本书也涉及电视机播放目的以外的 CMOS 图像传感器技术,希望尽可能以有限的篇幅,提供从一般技术到广泛应用的各层面的认识。由于照相机应用的技术越来越专业且多样化,因此实际上用一本专业书籍进行完整的介绍是不可能的。我想,即使是从事图像传感器、照相机信号处理的相关技术人员,仍有知识不足的地方。另外,为了避免初学者对于大量的专业术语感到困惑,对于在本书中重复出现的术语进行了粗略的解释。“专业术语解

释”中不乏英文部分,我想应该能派上用场。

作者从事 CCD 图像传感器与 CMOS 图像传感器的研究开发已近 20 年,基于在研讨会担任讲师的各方面经验汇编出本书。关于在研讨会上,学生提出的众多问题,即便是专家认为理所当然的问题,我也予以详细介绍,让大家确实地理解,这也是我希望做到的回馈。虽然从图像传感器漫长的历史来看,这些经验和知识实在微不足道,但为了让更多的人知道诸多前辈的伟大事迹,我才下定决心执笔编写本书。从对图像传感器感兴趣的学生,直到想弥补知识不足的专家,希望本书能助大家一臂之力。若进而出现技术革新的创新,我甚感荣幸。此外,关于介绍 CCD 图像传感器动作的部分,感谢 LINK RESEARCH 株式会社同意使用三维元件仿真器。

最后,本书出版之际除向诸位前辈表示敬意外,同时对给予各方协助人士,由衷表示感谢。

著 者

CCD/CMOS Image Sensor no Kiso to Ouyou

by Kazuya Yonemoto

Copyright © 2003 by Kazuya Yonemoto

All rights reserved.

Originally published in Japan by CQ Publishing Co., Ltd., Tokyo.

Chinese (in simplified character only) translation rights arranged with

CQ Publishing Co., Ltd., Japan.

CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用

米本和也 CQ 出版株式会社 2005

著者简介

米本和也

1959 年 出生于东京都

1984 年 早稻田大学研究生院理工学研究科硕士课程结业

同 年 进入索尼公司,就职于厚木工厂半导体事业本部 CCD 事业部从事
CCD 图像传感器、CMOS 图像传感器研发工作

2001 年 担任三星电子 System LSI 事业部 CCD 开发责任研究委员(常务)

2002 年 早稻田大学研究生院理工学研究科博士课程毕业,获工学博士

2003 年 进入松下电器产业株式会社

现 在 就职于松下半导体事业总部图像传感器商业单元开发组

目 录

第 1 章 图像传感器的历史——从摄影元件的诞生到 CCD/CMOS 图像传感器	1
1.1 图像传感器的登场	1
1.2 固态图像传感器	2
1.3 CCD 图像传感器的实用化	3
1.4 CMOS 图像传感器	6
参考文献	10
第 2 章 何谓图像传感器——基于光电转换与扫描的摄影基本概念	13
2.1 基本概念	13
2.1.1 受 光	14
2.1.2 信号的读出	14
2.1.3 图像信号的传输	14
2.1.4 光电转换与扫描	16
2.2 图像传感器的很多种类	18
2.2.1 光电转换的材料	18
2.2.2 扫描方式	19
2.2.3 像素为无源还是有源	19
2.3 超过预期的多用途与未来的梦想	20
2.3.1 用于任何场所	21
2.3.2 特殊用途	21
参考文献	22
第 3 章 CCD 图像传感器的基础——从光电转换到信号输出的方式与特征	23
3.1 动作原理	23
3.1.1 光电转换	24

3.1.2 电荷的储存	28
3.1.3 电荷的转移(CCD 的原理)	34
3.1.4 电荷的检测	45
3.2 转移方式与扫描方式	51
3.2.1 帧转移方式	51
3.2.2 行间转移方式	53
3.2.3 帧行间转移方式	55
3.2.4 扫描方式与读出转移动作	57
3.2.5 其他转移方式	60
3.3 像素的构造与动作	65
参考文献	70

第 4 章 CCD 图像传感器的特性——感光度、动态范围及分辨率等

73

4.1 必须强调的基本特性	73
4.1.1 感光度	74
4.1.2 动态范围(饱和信号量)	83
4.1.3 分辨率	86
4.1.4 漏 光	90
4.1.5 残 像	93
4.1.6 光谱感光度	96
4.2 无法避免的噪声	98
4.2.1 随机噪声	98
4.2.2 固定图形噪声	102
4.2.3 噪声的评估	105
参考文献	108

第 5 章 CCD 图像传感器的应用技术——从静止图像到彩色视频

109

5.1 动作方式与送出的信号	109
5.1.1 端子构成举例	109
5.1.2 驱动时序与信号输出	110
5.1.3 信号输出的全貌	112
5.2 特有功能与特殊的摄影方式	114
5.2.1 电子快门	115

5.2.2	手震校正	118
5.2.3	快门校正	121
5.2.4	广动态范围摄影	122
5.2.5	高速摄影	124
5.3	数字照相机 CCD 图像传感器的差异	127
5.3.1	两种 CCD 图像传感器	127
5.3.2	动作时序	130
5.4	信号的处理方式	131
5.4.1	黑白照相机系统与信号处理	132
5.4.2	单板式彩色 CCD 图像传感器与 信号处理	134
5.4.3	数字照相机的信号处理	140
5.4.4	制 图	141
	参考文献	144

第 6 章 CMOS 图像传感器的特征与技术——从基础到 解决固定图形噪声 147

6.1	CMOS 图像传感器的特征——与 CCD 图像传感器的比较	147
6.1.1	构造与动作方式的差异	148
6.1.2	制造过程与片上系统	150
6.1.3	特性与电源	151
6.1.4	储存的同时性	152
6.1.5	混 色	154
6.2	解决固定图形噪声的问题	156
6.2.1	固定图形噪声的产生原因	156
6.2.2	各种像素构造	158
6.2.3	抑制固定图形噪声的方法	165
	参考文献	175

第 7 章 片上系统——片上照相机、图像处理到嵌入功能 的技术 177

7.1	片上照相机	178
7.1.1	片上照相机的构成	178
7.1.2	片上系统的理想状态	179

7.2	再现图像以外的功能	180
7.2.1	边缘检测	180
7.2.2	图形匹配	182
7.2.3	分辨率可变与注视	183
7.3	广动态范围摄影	183
7.3.1	双道采样	184
7.3.2	对数转换	185
7.3.3	储存电容调制方式	186
7.3.4	像素内 A/D 转换器+多次采样 ...	187
7.3.5	像素内模拟处理方式	190
7.4	图像处理	191
7.4.1	感应式图像传感器	191
7.4.2	模拟二维 DCT 图像压缩	192
7.4.3	空间滤光片	193
7.5	三维传感	195
7.5.1	三角测量	195
7.5.2	光强度判定	197
7.5.3	光路差	198
7.6	其他功能	200
7.6.1	动态检测	200
7.6.2	全面曝光	202
7.6.3	色彩分离光电二极管	203
7.6.4	Foveated Image Sensor	205
	参考文献	206

附录 A	光电元件相关的基础知识	209
A.1	P 型硅和 N 型硅	209
A.2	泊松(Poisson)方程式——电流密度方程式、电流连续方程式	210
A.3	光学尺寸与有效视场角对角长	211
A.4	光强度与感光度	212
A.4.1	光强度定义	212
A.4.2	各种基准之间的关系	212
A.4.3	色 温	214
A.4.4	量子效率与感光度	215

A. 4. 5 数字照相机的感光度	215
A. 4. 6 红外截止滤光片的光谱透过率 ...	217
A. 5 基于像素开口采样的 MTF 与混淆	218
A. 6 kTC 噪声(复位噪声)的噪声电压	220
A. 7 CDS 电路的滤波器特性	222
A. 8 采样 & 保持(Sample & Hold)电路与阈值 偏差	223
A. 9 二维离散余弦变换与一维转换的关系 ...	224
A. 10 物理常数	224
参考文献	225
 专业术语解释	 227

第 1 章

图像传感器的历史

——从摄影元件的诞生到 CCD/CMOS 图像传感器

介绍图像传感器的技术之前,我想大家会对其如何发展至今的过程,应该也有浓厚的兴趣吧。那就先来看看它的历史吧。图像传感器发展到今天,成为实用且高性能的图像传感器,是研究人员与技术人员经历了无数次的试验,付出很大的努力才得以完成的。实在令人钦佩不已¹⁾。

1.1 图像传感器的登场

图像传感器是何时开始出现在这个世界的呢?当然,图像传感器的目的是为了将拍摄的图像转换成电信号用于远距离播放,也就是说,在电视机这类的系统中,扮演制作相当于图像输入口的照相机的角色。由于最早设计图像传感器时,晶体管类的固态元件还未出现,因此当时作为放大电信号的元件,只使用了收音机等中的真空管。

随后登场的是 1933 年发明的光电摄像管(iconoscope),是利用在真空中可自由操作电子运动的性质制作的。如图 1.1 所示,在真空中放置的云母板上涂抹具有光电效应的铯(Cs),通过镜头的光线在云母板上成像。此处产生的电荷,经灯丝放出的电子束进行扫描,取出信号电流。之后,移像正析摄像管(image orthicon)、光导摄像管(vidicon)、硒砷碲(saticon)摄像管、雪崩倍增靶(HARP)摄像管等,改良感光度的摄像管一个接一个被发明,担任产生电视图像的角色。

1) 由于没有亲眼目睹过图像传感器的演变过程,因此我的调查主要是依靠过去的主要论文而进行的。

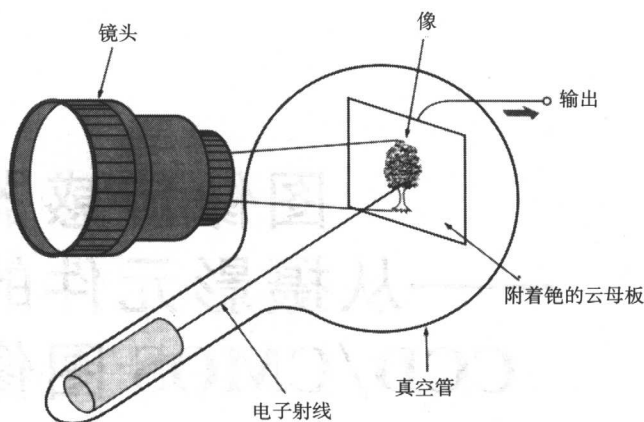


图 1.1 光电摄像管的构造

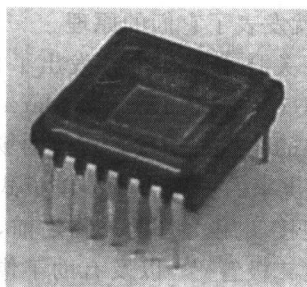
由于晶体管的发明,从收音机到电视机,晶体管取代了真空管的地位。不过在电视机方面,除了阴极射线管外,作为光入口的摄像管可以说是最后一个非固态的元件。从原理可知,摄像管确实有接上电源无法立刻使用,工作电压高、功耗大,因燃烧导致寿命变短等众多缺点。此外,图像传感器无法立即取代晶体管类固态元件,主要是因为若没有单片(monolithic¹⁾)集成电路(IC: Integrated Circuits)的出现,图像传感器也无法实现实用化。因此,固态图像传感器(固态图像元件)在晶体管发明约十年后,一直等到集成多数晶体管的集成电路出现后才诞生。而图像传感器的开发,从 20 世纪 60 年代的后半期开始。

1.2 固态图像传感器

大家都知道,用于晶体管或 IC 的 Si(硅)等半导体,具有将接受的光转换成电的光电变换性质。然而如何将此处产生的电信号,正确且有效地取出,可以说是图像传感器固态化的最大课题(照片 1.1)。简单地说,在成为单片 IC 基台的 Si 基板作为摄影面有规则地排列光电二极管(photodiode),然后依次将光电二极管的光电流以任何方法取出,即具有图像传感器的功能。

然而,是否可以实现实用化又是另一回事,无法一言而喻。不

1) 同一个半导体基板上形成许多元件的技术。相对于此,在其他的基板上将晶体管单体等以电线连接、形成模具者,称为混合集成电路(hybrid IC)。



照片 1.1 CCD 图像传感器的封装外观(ICX206AK,索尼)

过,这正是图像传感器有趣之处,也是将这种简单的想法如何实现为固态图像传感器(solid-state image sensor),让许多的研究人员煞费了苦心。最后也确实开发出了各种各样的方法。

最早可以产生图像、像素平面排列的固态图像传感器,其构造与目前的 CCD 图像传感器不同,例如发表于 1966 年的光敏晶体管平面排列的图像传感器^[1]。1967 年发表了将光电二极管以平面矩阵排列,利用扫描脉冲与 MOS 晶体管,以 XY 地址方式取出信号的方法^[2]。这种方法后来虽实现了实用化,但与 CCD 图像传感器的开发竞争中失败,成为已消失的 MOS 型图像传感器原型。

1969 年,CCD(Charge Coupled Device,电荷耦合元件)由贝尔研究所的 W. S. Boyle 与 G. E. Smith 发明,并于次年发表^[3]。由于 CCD 具有储存信号电荷后传输的功能,可广泛应用于内存、显示器、延迟元件等。关键应用(killer application)的 CCD 图像传感器,利用称为帧转移(Frame Transfer)方式(FT-CCD)的简单构造,于 1971 年也由贝尔研究所发表^[4]。

虽然是题外话,与 CCD 具有相同功能的 BBD(Bucket brigade device,庖链器件)于 1969 年发表^[5],应用 BBD 的图像传感器也于 1970 年发表^[6]。然而,BBD 虽与 CCD 具有相同功能,但是就原理上来讲,信号电荷传输不完全,导致信号严重劣化,不适用于图像传感器的应用。

1.3 CCD 图像传感器的实用化

从 CCD 首次发表至今,为了达到实用化进行了众多的研究。早期的研究多以构造简单的 FT-CCD 方式为主。此外,决定图像传感器感光度的电荷检测技术之一的 FD(Floating Diffusion)^[7]电荷检测构造,以及目前最为广泛使用的 CCD 图像传感器构造的

IT-CCD^[8] 比较早期就发表了它们的原理。

在信号处理的相关技术方面也开发出了抑制 CCD 图像传感器信号内噪声的相关双采样(CDS: Correlated Double Sampling)电路^[9]等。与电视机的隔行扫描方式对应的场(Field)读出方式的发明^[10],对于动态分辨率的提高与新型单板式补色彩色滤光片的排列做出了贡献。迎接实用化时期来临之前,大力贡献于减少图像噪声的掩埋型光电二极管^[11],以及有助于像素尺寸的小型化和电子快门的垂直溢出构造光电二极管^[12],可以说是非常重要的研究成果。

另外,片上微镜头^[13]可以弥补缩小像素时的感光度下降,也有可能提高感光度,促进了摄影机的小型化且为它的普及做出了贡献。在这期间也开发了主要用于专业上的帧行间转移方式^[14]。

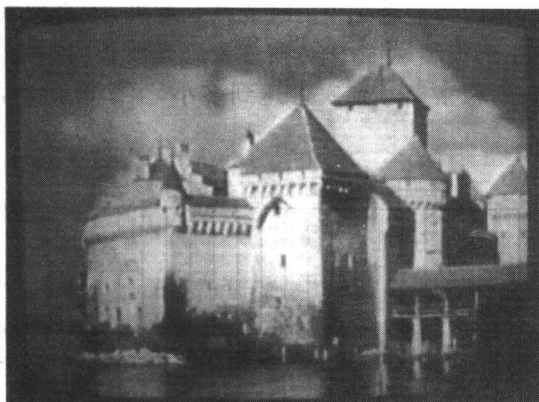
除了 CCD 图像传感器以外,也发表了基于 XY 地址方式的 MOS 型图像传感器^[15]、CID(Charge Injection Device,电荷注入器件)^[16]、CPD(Charge Priming Device,电荷引发器件)^[17]。此外,还有属于 CCD 之一的 CSD(Charge Sweep Device,电荷扫描器件)^[18]。

如同上述,提出了各式各样方式的图像传感器,然而实现实用化且用于照相机是一直等到 CCD 发明十多年后。而且,其中真正实用化的也只有 MOS 型图像传感器和 CCD 图像传感器而已。在家庭用方面,1981 年使用 MOS 型图像传感器的摄影机实现实用化,接着在 1982 年,使用 CCD 图像传感器的产品也随之登场^[19]。

当时,这两种图像传感器的开发竞争范围逐渐扩大,先出现的 MOS 型图像传感器,虽具有信号动态范围广的特点,但也有噪声多、感光度低的缺点。之后,随着图像传感器小型化与高性能化的趋势,加上摄影机的普及,面对感光度高、画质优良的 CCD 图像传感器,MOS 型图像传感器只好撤离市场。搭载于民用摄影机,宣告实用化的 CCD 图像传感器,我想应该是发表于 1985 年的 25 万像素高分辨率 CCD 图像传感器^[20](照片 1.2)。

而后 CCD 图像传感器的时代终于来临。正式实用化后,也开发出了许多基本技术,包括提高画质、拓展图像大小的功能。下面为大家介绍其中几项重要的技术。

CCD 图像传感器的曝光控制技术中,1986 年开发的电子快门^[22]是不可或缺的基本专利,几乎用于所有的 CCD 图像传感器。如果少了它,完全无法控制摄影机的快门速度。另外,目前摄影机



照片 1.2 摄影实例^[21]

的基本功能之一,不知不觉中使用的电子式手震校正技术^[23],也于 1990 年开发出来。利用此项技术,即使是轻巧易晃动的摄影机,也可以拍摄出专业级的稳定图像。

当 CCD 图像传感器主要用于摄影机时,1993 年开发出适用于静止图像的全像素读出方式^[24]。虽然此项技术最早的目的是为了提 高摄影机的分辨率,然而当数字照相机开始实用化时,摇身一变反而更适合用于数字照相机上,大力贡献于数字照相机的普及,可以说是相当有趣的一段经过。

从 20 世纪 80 年代后半期起,以 NHK 的高清晰电视节目的开播为契机,推动了 CCD 图像传感器的高分辨率化,加上宽屏幕电视节目开始播放,也出现可用 16:9 广角摄影的 CCD 图像传感器。数字照相机于 1995 年登场,开始了静止图像用的 CCD 开发,至今永无止境的分辨率竞争也随之展开。其中,2000 年发表了所谓蜂窝式(honeycomb)CCD^[25],可提高静止图像的分辨率,也是最 适合连续扫描(progressive scan)的像素构造,展现了崭新的突破。

在数字照相机的普及浪潮下,像素尺寸虽逐渐缩小,但直到 21 世纪才终于达到 $3\mu\text{m}$ 的水平。另外,由 Gordon Moore 博士所提出的半导体集成度会进一步提高的定律,同样也相当闻名^[26]。

以符合该定律的一种内存 SRAM 为例,集成度虽然在两年内增长两倍,但若针对用于目前主要民用照相机的 CCD 图像传感器的像素进行调查,四年内集成度上升了约两倍(图 1.2)。虽然二者均以直线上升,不过之所以 CCD 图像传感器的集成度上升速度

比内存缓慢,是因为前者必须处理光线。此外,未来像素的尺寸是否可持续缩小仍很难说,由于分辨率受到光波长的影响,应有一定的极限。然而,像素尺寸到底可达到多小,虽多有讨论,至今仍难以断言。

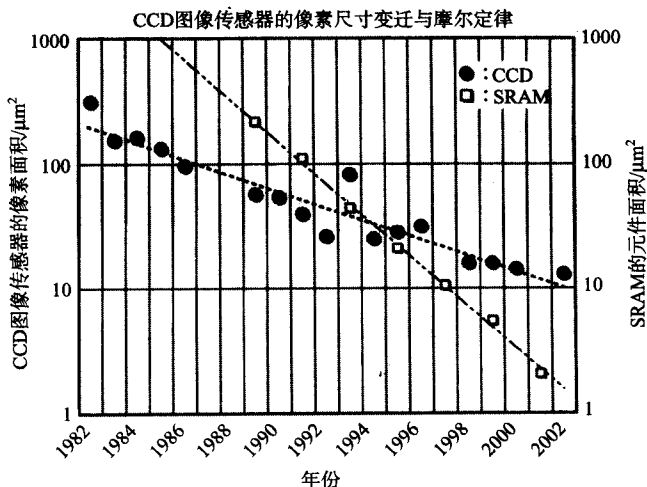


图 1.2 CCD 图像传感器的像素尺寸变迁与摩尔定律

（注：像素大小以 ISSCC 发表的结果为主，参考 IT-CCD、FIT-CCD 与部分 PS IT-CCD、FT-CCD 制成图表，摩尔定律参考 SRAM 的元件尺寸）

1.4 CMOS 图像传感器

本书介绍的另一种图像传感器,即 CMOS 图像传感器,它又是在何时、如何诞生的呢?在介绍之前,必须清楚区别 CMOS 图像传感器的分类。首先,由于从过去以来就不断研究照相机以外的特别用途,因此重点放在图像再现的图像传感器上。相对于旧式如 MOS 型图像传感器,其像素不具有信号电荷放大功能,故归类为 PPS(Passive Pixel Sensor,无源像素传感器),若像素具有信号放大功能,则称为 APS(Active Pixel Sensor,有源像素传感器)。

CMOS 图像传感器多为 APS,不过其中仍有属于 PPS 方式的图像传感器。于是 CMOS 图像传感器的诞生,由 APS 往前追溯,如表 1.1 所示,可以包括 CCD 发明前发表于 1996 年的 bipolar phototransistor 的图像传感器^[27]。在该论文中关于像素放大的叙述只有两行而已。