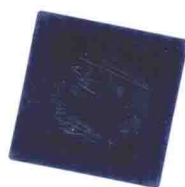
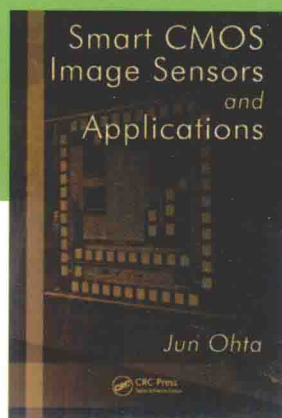


Smart CMOS Image Sensors and Applications

智能CMOS图像传感器与应用

[日] Jun Ohta 著

史再峰 徐江涛 姚素英 译



清华大学出版社

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group

信息技术和电气工程学科国际知名教材中

Smart CMOS Image Sensors and Applications

智能CMOS图像传感器与应用

[日] Jun Ohta 著

史再峰 徐江涛 姚素英 译

清华大学出版社

Smart CMOS Image Sensors and Applications 1st Edition/by Jun Ohta/ISBN: 0-8493-3681-2

Copyright© 2008 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版. 版权所有, 侵权必究.

Tsinghua University Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale and distribution in the People's Republic of China exclusively (except Taiwan, Hong Kong SAR and Macao SAR). No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由清华大学出版社独家出版并仅限在中国大陆地区销售. 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售.

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-0803

版权所有, 侵权必究. 侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

智能 CMOS 图像传感器与应用/(日)太田淳著; 史再峰, 徐江涛, 姚素英译.--北京: 清华大学出版社, 2015

书名原文: Smart CMOS Image Sensors and Applications

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

ISBN 978-7-302-39980-3

I. ①智… II. ①太… ②史… ③徐… ④姚… III. ①图象传感器—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 086346 号

责任编辑: 文 怡

封面设计: 张海玉

责任校对: 焦丽丽

责任印制: 宋 林

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 11

字 数: 267 千字

版 次: 2015 年 8 月第 1 版

印 次: 2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 35.00 元

产品编号: 055519-01

译者序

自鸿蒙而始,人类就是通过眼、耳、鼻、口、舌等器官来感知外界客观世界的,其中 80% 以上的信息来自于视觉。新技术的革命使人类社会开始进入信息时代,被称为“电五官”的传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。固体图像传感器作为人类视觉器官的延伸,是一种高度集成化的半导体光敏元阵列,具有体积小、工作电压低、性能稳定、畸变小等优点。CMOS 型和 CCD 型是常用的两类固体图像传感器。近年来 CMOS 图像传感器技术发展迅速,在消费电子、机器视觉、智能监控等许多应用领域,已取代 CCD 图像传感器而占据了主流市场,并且更多地应用到生物医学、航空航天等重要领域。智能 CMOS 图像传感器是内部集成了智能处理功能电路的 CMOS 图像传感器,相比传统的图像传感器,具有更加优越的性能,而且可以实现许多传统图像传感器无法实现的功能,应用前景相当广阔。

本书是一本关于智能 CMOS 传感器的特性和应用方面的书。前半部分主要介绍了 CMOS 图像传感器的原理和结构,后半部分主要介绍了智能 CMOS 图像传感器的关键要素及应用。全书通过递进的结构,循序渐进、力求清晰完整地给出智能 CMOS 图像传感器领域的关键要素,并给出了一些比较新颖的智能 CMOS 图像传感器的应用,如涉及信息通信、生物技术和医学方面的几类应用。本书作者 Jun Ohta 博士是日本著名的图像传感器领域的专家,有着多年的研究经验,本书是其多年科研工作的结晶。在电子科学和通信技术飞速发展的今天,引进一些国外原版教材对国内的科研事业是很有好处的。我们翻译此书的目的是促进智能 CMOS 图像传感器的相关知识在高校中的普及和发展,拓宽读者的视野,为他们将来的研究提供参考。本书可以作为微电子及其相关专业高年级本科生、研究生或相关工程技术人员的参考教材,在学习和科研过程中会很有帮助。

本书的翻译工作主要由天津大学 ASIC 设计中心的史再峰、徐江涛、姚素英三位老师共同完成,张晨、周佳慧、王晶波等多位研究生参与了后期的整理、图表翻译等工作,史再峰老师完成了统稿和审校,在此对整个翻译工作团队致以深深的谢意。百年以前,学贯中西的翻译家严复先生就提出了“信、达、雅”的翻译原则和标准。然而,在翻译实践中要想达到这个标准的确是一件极其困难的事情。尽管参与本书翻译工作的整个团队一遍一遍、字斟句酌地去推敲和修正,力求尽可能地把原版书的精髓呈现出来,但由于译者学识和水平有限,书中难免出现一些错误,敬请广大读者不吝赐教和批评指正。

译者

2015 年 6 月于天津大学

前 言

智能 CMOS 图像传感器主要强调在图像传感器上实现智能的功能和系统应用。某些智能图像传感器已进行商用,还有一些仅是提出概念而已。智能 CMOS 图像传感器领域发展迅速,同时还在促进发明更多的新型传感器。尽管我在这本书中一直努力收集关于智能 CMOS 图像传感器及其应用领域的相关文献资料,然而这个领域实在太广泛了,以至于部分内容难以尽述。此外,该领域的发展实在太迅速了,以至于在成书的过程中新的热点话题就已经出现。不过,我相信这本书已经充分覆盖了智能 CMOS 图像传感器领域的关键要素,所以它对于该领域的研究生和工程师还是会很有帮助的。

这本书的主要结构如下。首先第 1 章对 MOS 成像和智能 CMOS 图像传感器进行了介绍。第 2 章描述了 CMOS 图像传感器的基本要素和光电器件物理的相关知识,同时介绍了典型的 CMOS 图像传感器(如有源像素传感器(APS))的结构。接下来对智能成像器件描述的几个章节构成了本书的主要部分。第 3 章介绍了智能 CMOS 图像传感器的几个主要特征。第 4 章介绍了利用这些特征进行智能成像的技术,如宽动态范围图像检测、目标跟踪和三维测距等。在最后一章(即第 5 章)介绍了几个关于智能 CMOS 图像传感器的应用实例。

这项工作受到了众多先前出版的涉及 CMOS 图像传感器技术的书籍的启发。特别是: A. Moini 的 *Vision Chips*^[1]一书对视觉芯片的结构进行了全面概述; J. Nakamura 的 *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*^[2]一书全面介绍了此领域近年来的发展成果; K. Yonemoto 的 *Fundamentals and Applications of CCD/CMOS Image Sensors* 一书以及 O. Yadid-Pecht 与 R. Etienne-Cummings 合著的 *CMOS Imagers: From Phototransduction To Image Processing*^[4]一书,对 CCD 和 CMOS 成像器件进行了详尽深入的概述。其中给我印象最深刻的是 K. Yonemoto 的著作,可惜该书只有日文版本。我殷切希望现在的工作能有助于阐明这一领域的研究,作为对 Yonemoto 的书的有益补充。这本书的成书还受到了在相关领域许多其他日本高级研究人员的著作的影响,包括 Y. Takamura、Y. Kiuchi、T. Ando 和 H. Komobuchi 等诸位专家。J. P. Theuwissen 关于 CCD 的著作对本书的形成也很有帮助。

我衷心感谢所有对这本书提供直接或者间接帮助的人。特别是,我在奈良科技研究院的材料科学研究所光学器件实验室的同事 Takashi Tokuda 教授和 Keiichiro Kagawa 教授,他们对本书的重要贡献体现在第 5 章的主要部分。Masahiro Nunoshita 教授在实验室初期总是给予不断的支持和鼓励;实验室秘书 Kazumi Matsumoto 在许多行政事务上给予大力支持和帮助;实验室在读和已毕业的研究生做出了卓有成效的研究。没有他们的努力这本书是无法问世的,我想对这些人致以诚挚的谢意。

关于人工视网膜主题部分,需要感谢视网膜假体项目的负责人 Yasuo Tano 教授、Takashi Fujikado 教授、Tetsuya Yagi 教授和大阪大学的 Kazuaki Nakauchi 博士。同时感谢 Nidek 有限公司的人工视网膜项目组成员 Motoki Ozawa、Shigeru Nishimura 博士、

Kenzo Shodo、Yasuo Terasawa、Hiroyuki Kanda 博士、Akihiro Uehara 博士和 Naoko Tsunematsu。深深感谢该项目顾问委员会成员东京大学的 Ryoichi Ito 名誉教授和大阪大学的 Yoshiki Ichioka 名誉教授。视网膜假体项目由日本新能源与工业技术发展组织 (NEDO) 的下一代战略技术专项提供资助, 还有来自日本卫生与劳动福利部的劳动与健康基金提供的资助。同时感谢人体内窥图像传感器科研项目组的 Sadao Shiosaka 教授、Hideo Tamura 教授和 David C. Ng 博士。这本书的部分工作内容还得到了 STARC(半导体技术社研究中心) 的支持, 我在这里同时也感谢研究解调 CMOS 图像传感器的 Kunihiro Watanabe 及其合作者。

我第一次进入 CMOS 图像传感器研究领域是在 1992—1993 年, 那时我是科罗拉多大学博尔德分校 Kristina M. Johnson 教授的访问研究员。在那里的经历是很令人振奋的, 它让我在回到三菱电气集团后的起步研究中受益颇丰。我要感谢在三菱电气集团的所有同事的帮助和支持, 包括 Hiforumi Kimata 教授、Shuichi Tai 博士、Kazumasa Mitsunaga 博士、Yutaka Arima 教授、Masahiro Takahashi 教授、Masaya Oita、Yoshikazu Nitta 博士、Eiichi Funatsu 博士、Kazunari Miyake 博士、Takashi Toyoda 等。

真诚地感谢 Masatoshi Ishikawa 教授、Mitumasa Koyanagi 教授、Jun Tanida 教授、Shoji Kawahito 教授、Richard Hornsey 教授、Pamela Abshire 教授、Yasuo Masaki 和 Yusuke Oike 博士允许我在书中使用他们的数据。我从日本图像信息和电视工程师协会的成员 Masahide Abe 教授、Shoji Kawahito 教授、Takayuki Hamamoto 教授、Kazuaki Sawada 教授、Junichi Akita 教授和日本众多图像传感器组的研究人员, 包括 Shigeyuki Ochi 博士、Yasuo Takemura 博士、Takao Kuroda、Nobukazu Teranishi、Kazuya Yonemoto 博士、Hirofumi Sumi 博士、Yusuke Oike 博士和其他人员那学到了许多知识。特别想感谢 Taisuke Soda, 是他提供给我出版这本书的机会; 还要感谢 Pat Roberson、Taylor 和 Francis/CRC 在完成这本书过程中的耐心。没有他们持续不断的鼓励, 我是不可能完成这本书的。

我将向 Ichiro Murakami 致以最深切的感谢, 他总是激起我在图像传感器和相关主题的研究热情。最后, 我想对我爱妻 Yasumi 致以特别的谢意, 感谢她在成书的漫长过程中对我的理解与支持。

Jun Ohta

2007 年 7 月于奈良

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 综述	1
1.2 CMOS 图像传感器的简史	1
1.3 智能 CMOS 图像传感器发展简史	4
1.4 本书的内容安排	6
第 2 章 CMOS 图像传感器技术基础	8
2.1 概述	8
2.2 光电探测器的基本原理	9
2.2.1 吸收系数	9
2.2.2 少数载流子的行为	9
2.2.3 灵敏度和量子效率	11
2.3 智能 CMOS 图像传感器中的光电探测器	12
2.3.1 PN 结光电二极管	12
2.3.2 光电门	18
2.3.3 光电晶体管	18
2.3.4 雪崩光电二极管	19
2.3.5 光电导探测器	19
2.4 PD 的积累模式	20
2.4.1 积累模式下的电势变化	20
2.4.2 势垒描述	21
2.4.3 PD 中光生载流子的运动	22
2.5 基本像素结构	24
2.5.1 无源像素传感器	24
2.5.2 3T-APS 有源像素传感器	26
2.5.3 4T-APS 有源像素传感器	27
2.6 传感器的外设	29
2.6.1 寻址	29
2.6.2 读出电路	31
2.6.3 模拟-数字转换器	32
2.7 传感器的基本特性	33
2.7.1 噪声	33
2.7.2 动态范围	35
2.7.3 速度	35
2.8 色彩	35

2.9 像素共享	36
2.10 像素结构比较	37
2.11 与 CCD 的比较	38
第 3 章 智能功能和材料	40
3.1 简介	40
3.2 像素结构	40
3.2.1 电流模式	41
3.2.2 对数传感器	42
3.3 模拟域操作	43
3.3.1 WTA 模式	43
3.3.2 映射	44
3.3.3 电阻网络	44
3.4 脉冲调制	46
3.4.1 脉冲宽度调制	47
3.4.2 脉冲频率调制	47
3.5 数字处理	52
3.6 硅以外的材料	53
3.6.1 绝缘体上硅	53
3.6.2 扩展检测波长	55
3.7 非标准 CMOS 技术结构	57
3.7.1 3D 集成	57
3.7.2 集成光发射器	57
3.7.3 通过非标准结构实现颜色识别	59
第 4 章 智能成像	62
4.1 简介	62
4.2 低光成像	63
4.2.1 低光成像中的主动复位	64
4.2.2 PFM 在低光成像中的应用	64
4.2.3 差分 APS	65
4.2.4 采用 Geiger 模式 APD 的智能 CMOS 图像传感器	66
4.3 高速度	66
4.3.1 全局快门	66
4.4 宽动态范围	67
4.4.1 宽动态范围的原理	67
4.4.2 双重敏感性	68
4.4.3 非线性响应	69
4.4.4 多次采样	70
4.4.5 饱和探测	72
4.4.6 亮度扩散	73

4.5	解调	73
4.5.1	解调的原理	73
4.5.2	相关法	74
4.5.3	双电荷存储区法	75
4.6	三维测距	78
4.6.1	时差测距	79
4.6.2	三角测距	82
4.6.3	关键值深度法	83
4.7	目标追踪	84
4.7.1	用于目标追踪的最大值检测法	85
4.7.2	用于目标追踪的投影法	85
4.7.3	基于电阻网络及其他模拟处理的目标追踪	85
4.7.4	基于数字处理的目标追踪	85
4.8	像素与光学系统的专用装置	87
4.8.1	非正交排列	87
4.8.2	专用光学系统	90
第5章	应用	93
5.1	引言	93
5.2	信息和通信应用	93
5.2.1	光学识别标签	93
5.2.2	无线光通信	99
5.3	生物技术的应用	104
5.3.1	多模式功能的智能图像传感器	105
5.3.2	结合 MEMS 技术电位成像	107
5.3.3	光学和电化学成像的智能 CMOS 传感器	108
5.3.4	荧光探测	110
5.4	医学上的应用	114
5.4.1	胶囊型内窥镜	114
5.4.2	视网膜假体	115
附录 A	常量表	123
附录 B	光照度	124
附录 C	人眼和 CMOS 图像传感器	127
附录 D	MOS 电容的基本特性	129
附录 E	MOSFET 的基本特性	131
附录 F	光学格式和分辨率	134
参考文献		135

第 1 章 引 言

1.1 综述

互补金属氧化物半导体(CMOS)型图像传感器近年来已经成为一个广泛研究的课题,并且取得了长足的发展。如今,它已经能与曾经长期占主流的电荷耦合器件(CCD)型图像传感器共同占据市场了。CMOS 图像传感器不仅大量用于便携式数码相机、手机摄像头、手持摄像机和数码单反相机等消费类电子产品中,而且已经广泛用于智能汽车、卫星、安保、机器人视觉等领域。近年来,越来越多的 CMOS 图像传感器出现在了生物技术和医药领域。在这些应用中,多数需要宽动态范围、高速和高灵敏度等先进性能,而另外一些则需应用实时目标跟踪、三维测距等专属功能。这些性能和功能需求对于传统图像传感器来说是难以实现的,即便是采用一些信号处理设备也不足以实现这些需求。然而智能 CMOS 图像传感器或者片上集成了智能处理功能的 CMOS 图像传感器就能实现上述功能。

相比于 CCD 图像传感器成熟的制造工艺,CMOS 图像传感器的制造是基于标准 CMOS 大规模集成电路(LSI)制造工艺的,该特性使 CMOS 图像传感器可以在芯片内部集成相关功能电路以实现智能的 CMOS 图像传感器,从而使它比 CCD 和传统 CMOS 图像传感器拥有更优越的性能,并可以实现许多传统图像传感器无法实现的功能。

当前,在智能 CMOS 图像传感器领域的研究主要有两个方向:其一是提升或改进 CMOS 图像传感器的一些基础特性,如动态范围、速度、灵敏度等;其二是实现一些新型功能,如三维测距、目标追踪和调制光检测等。在这两个领域内,目前已经有多种新型架构、结构以及新型材料被提出并经过验证。

下列的一些术语也与智能 CMOS 图像传感器相关:具有计算能力的 CMOS 图像传感器、集成功能图像传感器、视觉芯片、焦平面图像处理等。这些术语除了视觉芯片以外,其他的实际上都是以图像传感器在成像的基础上加入其他功能名称而命名的。而视觉芯片的命名则源于一个由 C. Mead 和他的同事提出来并加以完善的仿生视觉系统的设备,这个设备将会在以后的章节中加以介绍。接下来,本书将简要叙述 CMOS 图像传感器的发展历史。

1.2 CMOS 图像传感器的简史

1. MOS 成像仪的诞生

MOS 型图像传感器的历史起源于固态成像仪替代成像管的时代,如图 1.1 所示。随着固态图像传感器的诞生,图像传感器的 4 个重要功能得以实现:分别是光探测、光生电荷的积累、积累电荷向读出电路的转移以及扫描模式。这些功能将在第 2 章详加介绍。基于 X-Y 轴寻址型硅结光敏器件的扫描功能在 20 世纪 60 年代早期被霍尼韦尔公司的 S. R.

Morrison 和 IBM 公司的 J. W. Horton 等人提出,前者称之为“光扫描仪”^[9],后者称之为“扫描仪”^[10]。另外, P. K. Weimer 等人也提出了使用薄膜晶体管(TFTs)^[11]来实现带有扫描电路的固态图像传感器。在这些器件中,用于光探测的光电导薄膜将在本书的 2.3.5 节加以介绍。美国国家航空航天局的 M. A. Schuster 和 G. Strul 使用光电晶体管和开关器件实现了 X-Y 坐标寻址^[12],并以此成功地在一个 50×50 像素阵列传感器的基础上得到了完整的图像,这将在本书 2.3.3 节中介绍。

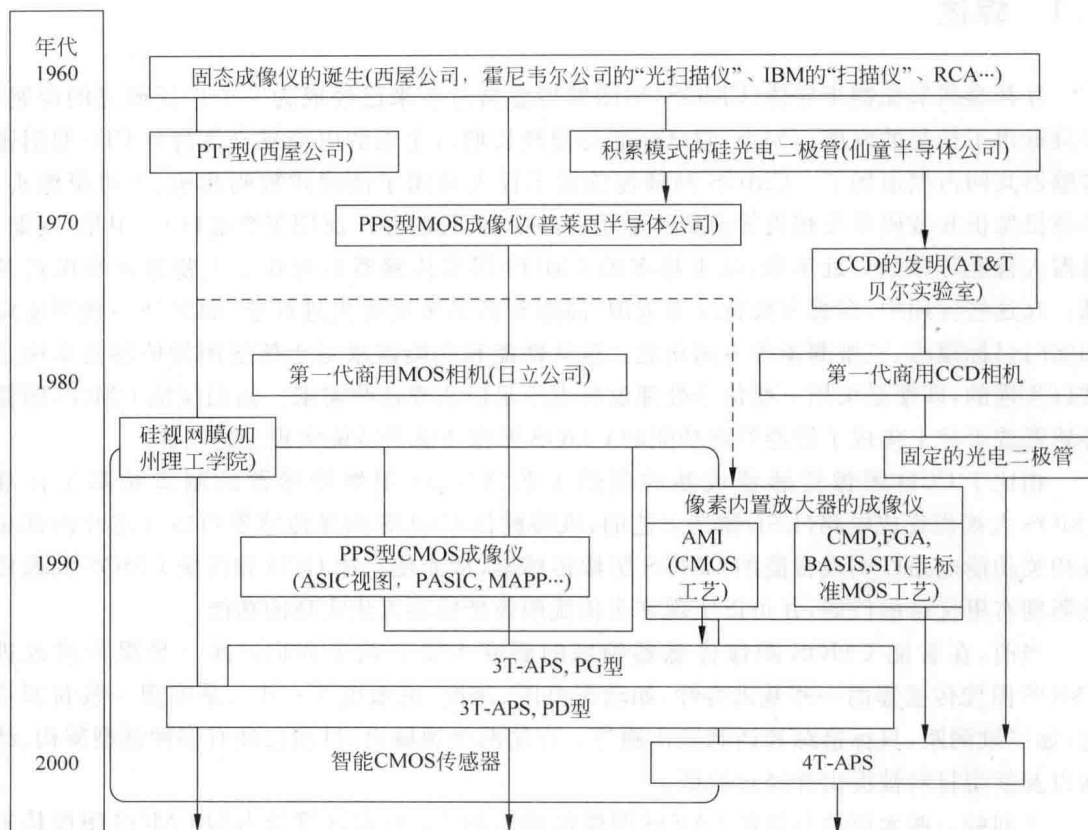


图 1.1 MOS 图像传感器以及相关结构的演变

光生电荷的累积作为 MOS 管图像传感器中重要的功能将在 2.4 节中加以详细介绍。这种结构是由仙童半导体公司的 G. P. Weckler 首先提出的^[13]。其中,源极浮空的 MOS 管被用作光电二极管,这种结构至今仍然应用于某些 CMOS 图像传感器中。Weckler 随后使用这种结构制作了一个 100×100 像素阵列的图像传感器加以验证^[14]。在这之后,还有许多固态传感器的模型被提出并加以研究^[14-17],这些都在参考文献^[18]中做了详细总结。

Plessey 公司的 P. J. Noble 提出了改进型固态图像传感器,这种传感器与 MOS 管型图像传感器以及无源像素传感器十分相似,它包括了一个光电二极管和一个具有 X、Y 轴扫描行选的 MOS 管开关以及一个电荷放大器,这些将在本书的 2.5.1 节详细介绍。Noble 还简要阐述了在同一个芯片上集成模式识别的逻辑电路的可能性,这或许就是智能 CMOS 图像传感器的概念首次被提出。

2. 与 CCD 的对比

IEEE 期刊 *Electron Device* 在 1968 年出版了关于固态图像传感器的论文之后不久, CCD 图像传感器诞生了。CCD 图像传感器(CCDs)是由 AT&T 贝尔实验室的 W. Boyle 和 G. E. Smith 在 1969 年发明的,几乎在同时由实验进行了验证。诞生之初,CCD 是被当作磁性气泡存储器替代者的半导体气泡存储器而研究的,但不久后它开始应用于图像传感器上。这些早期的 CCDs 研究成果可以查阅参考文献[21]。

经过科研人员们前赴后继的努力,第一款商业化 MOS 图像传感器终于在 20 世纪 80 年代问世^[22-27]。虽然日立公司和松下公司一直在研究 MOS 图像传感器,但由于 CCD 图像传感器的画质比 MOS 型更好,直到最近它还一直被广泛地制造和使用。

3. 像素内置放大器型固态成像仪

后来,研究人员通过在像素中内置放大器的方法来提高 MOS 成像仪的信噪比(SNR)。在 20 世纪 60 年代,光电晶体管型成像仪被研制成功^[12];80 年代后期,科研人员发明了许多放大器型的成像仪,包括电荷调制器件(CMD)^[29]、悬浮栅阵列(FGA)型^[30]、基于存储型图像传感器(BASIS)^[31]、静电感应晶体管(SIT)型^[32]、放大器型 MOS 成像仪(AMI)^[33-37]等。除了 AMI 之外,其他成像仪在制造像素的时候都需要更改标准的 MOS 制造工艺,因而最终没有被商业化和继续研究。AMI 可以使用任意标准 CMOS 工艺来制造而无须任何改变,而且 AMI 还使用了和有源像素图像传感器(APS)同样的像素结构。尽管 AMI 型使用了 $I-V$ 转换器作为读出电路而 APS 使用的是源极跟随器,但这并不会造成关键性差异,所以 APS 也属于像素内置放大器型的图像传感器。

4. 现代 CMOS 图像传感器技术

有源像素图像传感器最初是由喷气推进实验室(JPL)的 E. Fossum 等人利用光栅(PG)实现的,后来才使用光电二极管实现^[38,39]。使用光栅主要是为了便于处理电荷信号,但是由于作为栅材料的多晶硅在可见光波长区内是不透明的,所以光栅结构的灵敏度较差。现在大多数有源像素图像传感器使用的是光电二极管,这种结构被称为 3T-APS(三管有源像素图像传感器),这种结构已经被广泛地应用在 CMOS 图像传感器中。在 3T-APS 的发展之初,其图像质量在固定模式噪声(FPN)和随机噪声方面远不能和 CCDs 相比。虽然引入了一些噪声消除电路来消除固定模式噪声,但仍无法处理随机噪声的问题。

后来,通过加入一个常用于 CCD 传感器的具有低暗电流和完全耗尽层的光电二极管,成功地研制出了 4T-APS(四管有源像素图像传感器)^[40]。4T-APS 通过使用相关双采样(CDS)技术成功消除了随机噪声中占主要成分的 $k_B TC$ 噪声,其成像质量已经可以和 CCD 图像传感器比肩了。但相比于 CCDs,4T-APS 最主要的问题还是像素尺寸过大。每个 4T-APS 像素中有 4 个晶体管加一个 PD 和一个浮动扩散区,而每个 CCDs 中只有一个传输门和一个 PD。虽然 CMOS 制造工艺的进步使像素尺寸在缩小,进一步促进了 CMOS 图像传感器的发展,但从本质上它还是难以达到 CCDs 那么小的像素尺寸。最近,科研人员成功研究出一种像素共享技术并已经广泛应用在 4T-APS 中,从而有效地减小了它的像素尺寸,使得 4T-APS 已经可以和 CCDs 相媲美了。图 1.2 显示了 4T-APS 像素尺寸的发展趋

势,其中 CCDs 的像素尺寸如图中空心方块所示,该图表明,CMOS 图像传感器像素尺寸已经可以与 CCD 比肩。

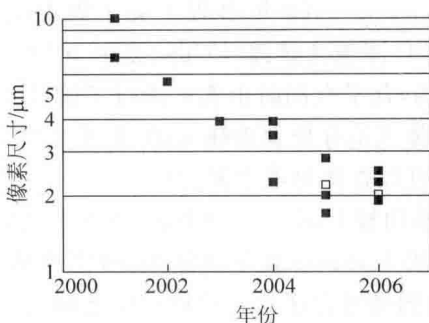


图 1.2 4T-APS 型 CMOS 图像传感器像素尺寸发展趋势(图中实心和空心方块分别代表 CMOS 和 CCD 图像传感器的像素尺寸)

1.3 智能 CMOS 图像传感器发展简史

1. 视觉芯片

如图 1.3 所示,共有 3 种主要类型的智能图像传感器,它们分别是:像素级智能图像传感器、芯片级(或称为片上相机)智能图像传感器以及列级智能图像传感器。第一种像素级并行处理智能图像传感器也称为视觉芯片。在 20 世纪 80 年代,C. Mead 和他的同事们在加州理工学院提出并展示了视觉芯片(也称为硅视网膜)^[42]。硅视网膜能模仿人的视觉系统,并通过使用大规模硅基集成电路技术来实现大数据量并行处理,该电路工作在亚阈值区

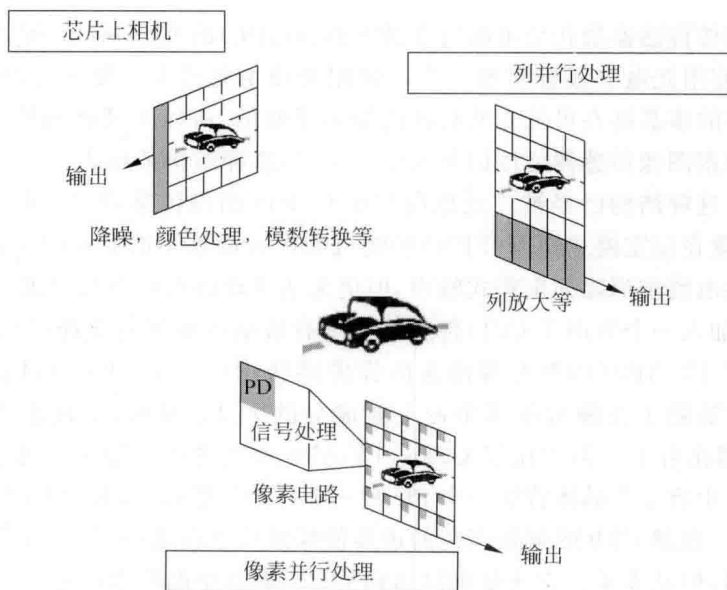


图 1.3 智能传感器的 3 种类型

以实现低功耗的目的,详情见附录 E。此外,通过加入一些二维电阻网络结构的电路,可自动解决某些特定问题,详见 3.3.3 节。而由于光电晶体管(PTr)的增益功能被经常用作光探测器。自从 20 世纪 80 年代以来,Koch、Liu^[43]和 A. Moini^[1]等人在开发视觉芯片和类似器件上做了大量的工作。目前在焦平面上的大规模并行处理是十分热门的课题,它已经成为了许多相近领域的主要课题,如可编程人工视网膜^[44]等。这方面的许多应用已经实现了商业化的目标,如大阪大学的 T. Yagi、S. Kameda 等人应用 3T-APS 研制的双层电阻网络等^[45,46]。

图 1.4 是国际半导体技术蓝图(ITRS)中的大规模集成电路的路线图^[47]。这幅图向我们展示了动态随机存取存储器(DRAM)半间距的发展趋势,而其他工艺技术如逻辑制程工艺也呈现出几乎相同的发展趋势,这也正好揭示了大规模集成电路的集成密度正如摩尔定律所言:每隔 18~24 个月增长一倍^[48]。

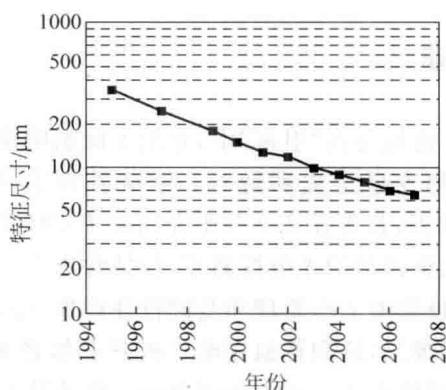


图 1.4 ITRS 发展路线图；DRAM 半间距的发展趋势

CMOS 工艺的进步意味着大规模并行处理或像素级并行处理变得更加切实可行了。这方面已经有相当多的研究成果问世,如基于细胞神经网络(CNN)的视觉芯片^[49-52]、可编程多指令流多数据流(MIMD)视觉芯片^[53]、仿生学数字视觉芯片^[54]、模拟视觉芯片^[55,56]等。其他开创性工作包括东京大学和滨松光子学株式会社的 M. Ishikawa 等人研制的基于单指令多数据流(SIMD)处理器的像素级处理视觉芯片等^[57-63]。

值得注意的是,一些视觉芯片并不是基于人类视觉处理系统的,因此它们属于像素级处理的范畴。

2. CMOS 工艺技术和智能 CMOS 图像传感器的发展

作为第二种智能传感器,像素级传感器与 CMOS 的工艺技术发展更是息息相关,而与像素并行处理方式几乎无关。这种结构包括片上系统以及相机系统。在 20 世纪 90 年代早期,由于 CMOS 工艺技术的进步,使得实现高集成度 CMOS 图像传感器或用于机器视觉的智能 CMOS 图像传感器变成可能。在这方面前人做了一些开创性的工作,包括 ASIC 视觉系统(最初由爱丁堡大学^[64,65]开发后来由 VISI 视觉有限公司接手(VVL))、源于瑞典林雪平大学^[67]的接近传感器的图像处理技术(NSIP)(也就是后来的 PASIC^[66]),以及由集成视觉产品(IVP)公司研制的 MAPP^[68]。

PASIC 可能是第一款使用了列级模数转换器(ADC)的 CMOS 图像传感器^[66]。ASIC 视觉系统使用了一种 PPS 结构^[67],而 NSIP 使用的是一个基于传感器的脉冲宽度调制器^[67],MAPP 使用的是 APS 结构^[68],详情见本书的 3.4.1 节。

3. 高性能的智能 CMOS 图像传感器

上文提到的这些图像传感器中包括了一些列并行结构,也就是第三种智能图像传感器结构。因为采用了每列独立供电,列并行结构非常适合于 CMOS 图像传感器。列并行结构可以提高 CMOS 图像传感器的性能,如可以增大动态范围和提高处理速度。通过和 4T-APS 相结合,列并行结构拥有了高质量的成像能力和多种功能。因此,近年来列并行结构被广泛地应用在高性能 CMOS 图像传感器中。大规模集成电路技术的发展也扩大了这种结构的应用范围。

1.4 本书的内容安排

本书的内容安排如下。首先是在“引言”中,介绍了固态图像传感器的总体发展概况,同时介绍了智能图像传感器的发展历史和特点。紧接着在本书的第 2 章中,将详细介绍 CMOS 图像传感器的基础知识,首先在 2.2 节中介绍基于 CMOS 工艺的硅半导体的光电特性。然后在 2.3 节中介绍几种类型的光电探测器,包括常用于 CMOS 图像传感器中的光电二极管等,同时会对光电二极管的工作原理和基础特性详加介绍。在 CMOS 图像传感器中光电二极管工作在累积电荷模式,这和普通光电二极管在如光通信等其他应用中的运行模式有很大不同,这种累积模式将在 2.4 节中加以介绍。作为这章核心内容的像素结构,将在 2.5 节中详细介绍有源像素图像传感器(APS)和无源像素图像传感器(PPS)。在 2.6 节中,将介绍除像素之外的周围电路模块,寻址和读出电路也将在该节中介绍。在 2.7 节中,将讨论 CMOS 图像传感器的基本特性。另外这章中还介绍了色彩(2.8 节)和像素共享技术(2.9 节)。最后我们将在 2.10 节和 2.11 节中作出一些对比分析。

在本书第 3 章中,将介绍一些智能功能和材料,在一些传统 CMOS 图像传感器基础上引入一些新功能的智能 CMOS 图像传感器。首先在 3.2 节中,将介绍一些不同于传统有源像素传感器的像素结构,如对数型传感器。智能 CMOS 图像传感器可以被分为 3 大类:模拟、数字、脉冲,这些内容将在 3.3 节、3.4 节和 3.5 节中加以介绍。CMOS 图像传感器通常基于硅基 CMOS 工艺技术,但其他的一些工艺技术和材料可以被用来实现一些智能功能,例如,蓝宝石硅工艺就是制造智能 CMOS 图像传感器的备选方案。因此我们将在 3.6 节讨论除硅之外的其他工艺材料,而在 3.7 节中将介绍标准 CMOS 工艺以外的其他工艺技术。

结合在第 3 章中介绍的智能功能,第 4 章将会介绍一些智能图像传感器的实例。这些实例中将提到低光成像(4.2 节)、高速度(4.3 节)和宽动态范围(4.4 节)等技术。相比于传统 CMOS 图像传感器,这些智能图像传感器的主要特点就是能提供更好的性能。智能图像传感器的另一个特点是能实现一些传统图像传感器所不具备的多功能性。对于这一点我们也将加以介绍,如解调部分(4.5 节)、三维测距(4.6 节)和目标追踪(4.7 节)。在这章的最后,一些特有的像素和光学排列方式将被介绍。第 4.8 节中将介绍两种智能 CMOS 图像传

感器：非正交像素排列型和专用光学型。

在最后的第5章中,将介绍一些智能 CMOS 图像传感器的具体应用,涉及信息和通信技术、生物、医药等领域。这些应用都是在近几年问世的,它们无疑会对下一代智能 CMOS 图像传感器产生至关重要的影响。

本书最后的几个附录提供了一些正文中所涉及的部分数据、信息和注释等。

附录 I S

附录 I S 主要介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构和工作原理。首先介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构,包括像素阵列、读出电路、控制电路等。然后介绍了 CMOS 图像传感器的工作原理,包括像素的电荷转移、读出电路的信号放大等。最后介绍了 CMOS 图像传感器的主要性能指标,包括分辨率、灵敏度、动态范围等。

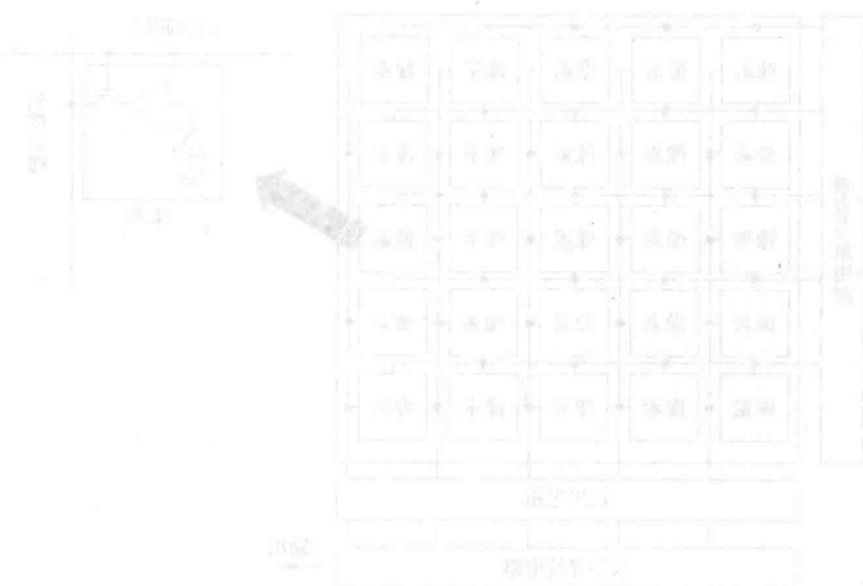


图 I S-1 CMOS 图像传感器的基本结构

附录 I S 主要介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构和工作原理。首先介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构,包括像素阵列、读出电路、控制电路等。然后介绍了 CMOS 图像传感器的工作原理,包括像素的电荷转移、读出电路的信号放大等。最后介绍了 CMOS 图像传感器的主要性能指标,包括分辨率、灵敏度、动态范围等。

附录 I S 主要介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构和工作原理。首先介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构,包括像素阵列、读出电路、控制电路等。然后介绍了 CMOS 图像传感器的工作原理,包括像素的电荷转移、读出电路的信号放大等。最后介绍了 CMOS 图像传感器的主要性能指标,包括分辨率、灵敏度、动态范围等。

附录 I S 主要介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构和工作原理。首先介绍了 CMOS 图像传感器的基本结构,包括像素阵列、读出电路、控制电路等。然后介绍了 CMOS 图像传感器的工作原理,包括像素的电荷转移、读出电路的信号放大等。最后介绍了 CMOS 图像传感器的主要性能指标,包括分辨率、灵敏度、动态范围等。

第2章 CMOS 图像传感器技术基础

2.1 概述

本章将主要阐述有助于理解 CMOS 图像传感器的相关知识。

一个 CMOS 图像传感器通常由一块包含像素阵列的成像区域,行、列寻址电路和读出电路等模块或单元组成,如图 2.1 所示。

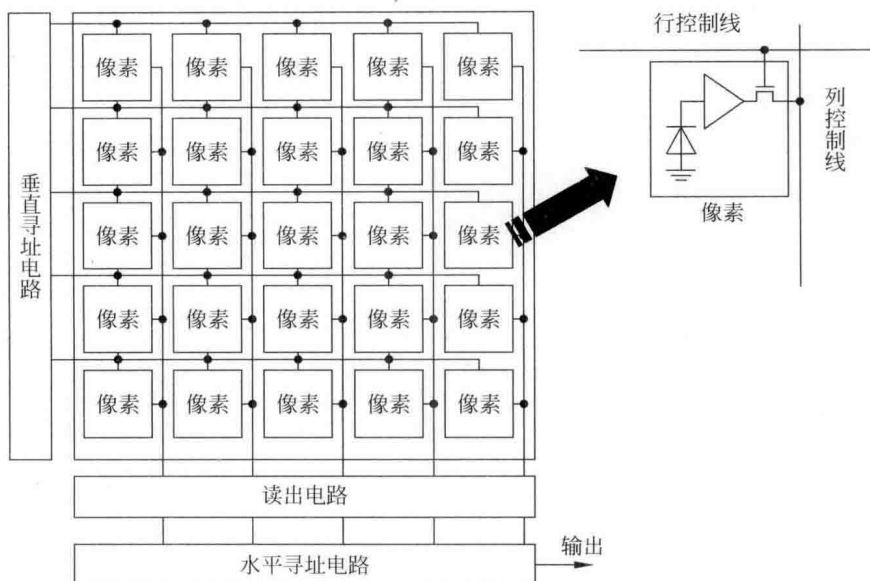


图 2.1 CMOS 图像传感器结构

成像区域是一个二维的像素阵列,每一个像素包含一个光电探测器和多个晶体管。这块区域是图像传感器的核心,成像质量很大程度上取决于该区域的性能。寻址电路用于接通一个像素并读取该像素中的信号值,它一般由扫描器或者移位寄存器来实现,而译码单元则被用来随机访问像素,这种特性有时对于智能传感器来说非常重要。读出电路由一维开关阵列和采样保持(S/H)电路组成,如相关双采样(CDS)这样的降噪电路就在这个区域中。

本章中将详细介绍这些构成 CMOS 图像传感器的基本模块。首先,介绍光电探测器的原理,其中少数载流子的行为起着至关重要的作用。然后介绍几种应用于 CMOS 图像传感器的光电探测器结构,PN 结光电二极管是最常用的结构,因此我们将详细介绍它的工作原理和基本特征。此外,也将介绍积累模式,这是 CMOS 图像传感器的一种重要工作模式。其次将介绍基本的像素结构,包括无源像素和有源像素。最后,对 CMOS 图像传感器的其他部分进行介绍,例如扫描单元和译码单元,读出电路和降噪电路等。