



航天工程系列精品出版项目  
南京航空航天大学“十四五”教材研究与建设基地

# 航天光学遥感器

## CCD/CMOS光电成像技术

黄巧林 著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像技术

黄巧林 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书共包括7章,全面介绍了作者30余年从事航天光学遥感器设计及研制中的 CCD/CMOS 光电成像技术。本书从航天光学遥感器应用及光电成像技术发展的角度出发,介绍了航天光学遥感器光电焦平面组件 FPA 的技术发展;分析了经典的光电传感器成像理论;介绍了 CCD、CMOS、sCMOS、TDICCD、TDICMOS、EMCCD 等光电图像传感器的基本工作原理;给出了以上光电传感器的性能指标的描述方法;为了设计航天光学遥感器光电焦平面组件 FPA,列举了大量不同类型的图像传感器及其工作时序驱动电路、相关双采样 CDS 电路、信号处理电路的应用例子;最后,作者利用自己几十余年航天光学遥感器设计研制经历及丰富的博士硕士生教学经验,讲述了航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像应用领域中的新技术,为读者开拓了航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像传感器的应用领域。

本书可作为光电技术、光学工程、应用光学、光学信息工程、光学技术及仪器、光学测绘等专业的本科生及研究生教材,也适用于航天光学遥感器设计及研制、航天飞行器设计等相关专业的工程技术人员阅读。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像技术/黄巧林著.

--北京:北京理工大学出版社,2021.8

ISBN 978-7-5763-0134-2

I. ①航… II. ①黄… III. ①航天遥感-图像传感器  
-光电效应-成像系统 IV. ①TP72 ②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 158986 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 21

彩 插 / 3

字 数 / 502 千字

版 次 / 2021 年 8 月第 1 版 2021 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 78.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调

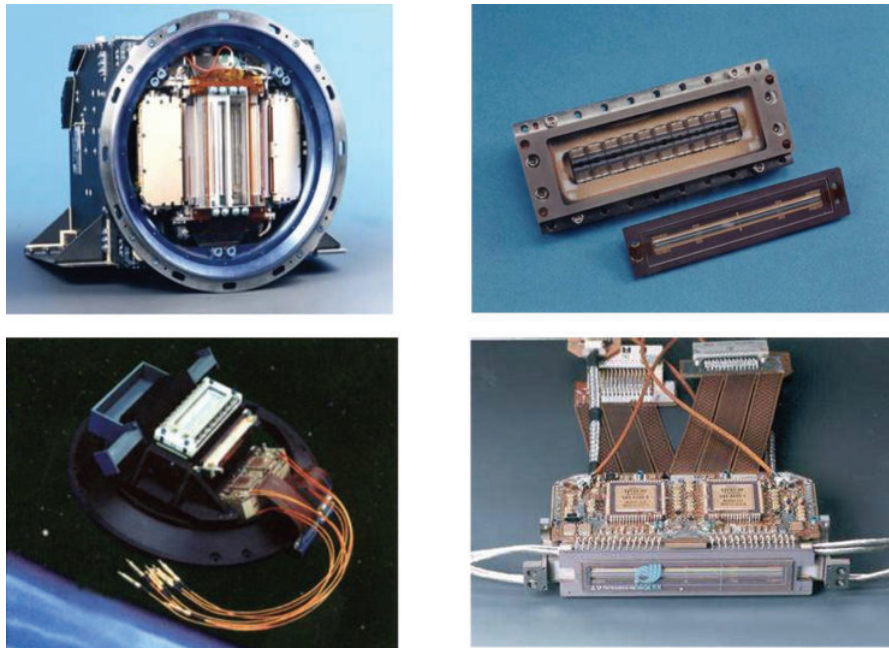


图 1-4 SPOT5 焦平面组件 FPA - DAT09

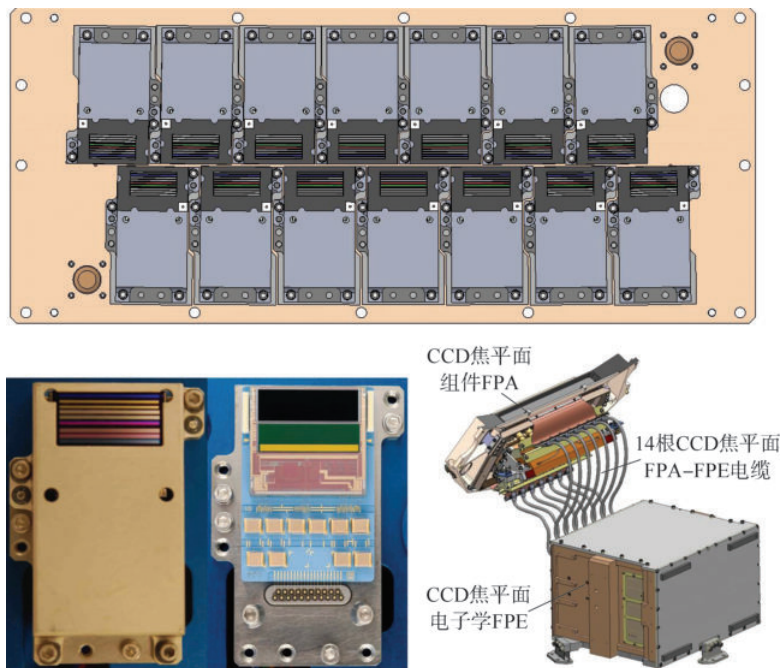


图 1-9 美国 LandSat - XX 系列的 CCD 焦平面组件 FPA



图 1-14 11 片 TDICCD 焦平面组件 FPA



(a)



(b)

图 1-17 单色黑白和彩色多光谱 CCD/CMOS 传感器

(a) 单色黑白 CCD/CMOS 传感器；(b) 彩色多光谱 CCD/CMOS 传感器

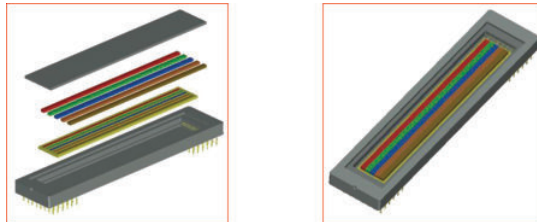


图 1-18 航天遥感器 TDICCD/TDICMOS 彩色多光谱成像技术图

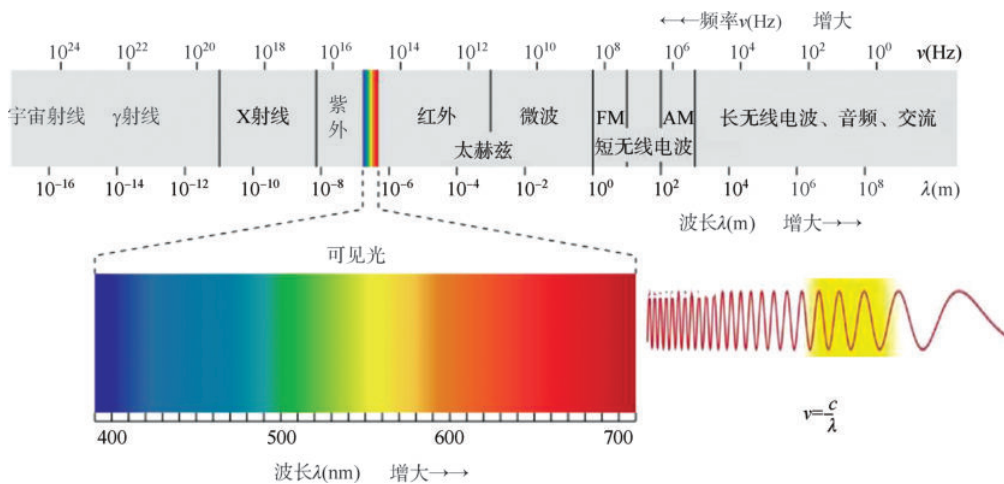


图 2-39 电磁波频谱分布图

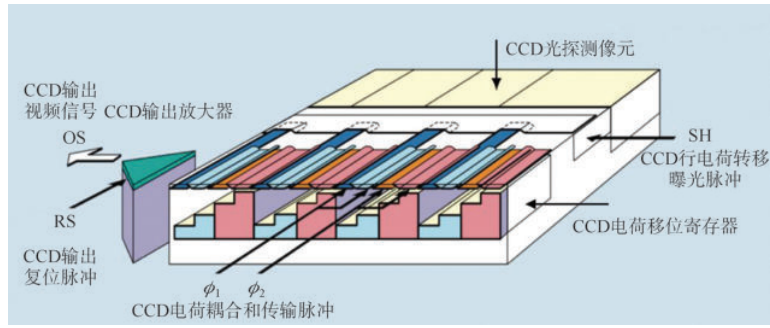


图 3-3 线阵 CCD 立体结构剖面图

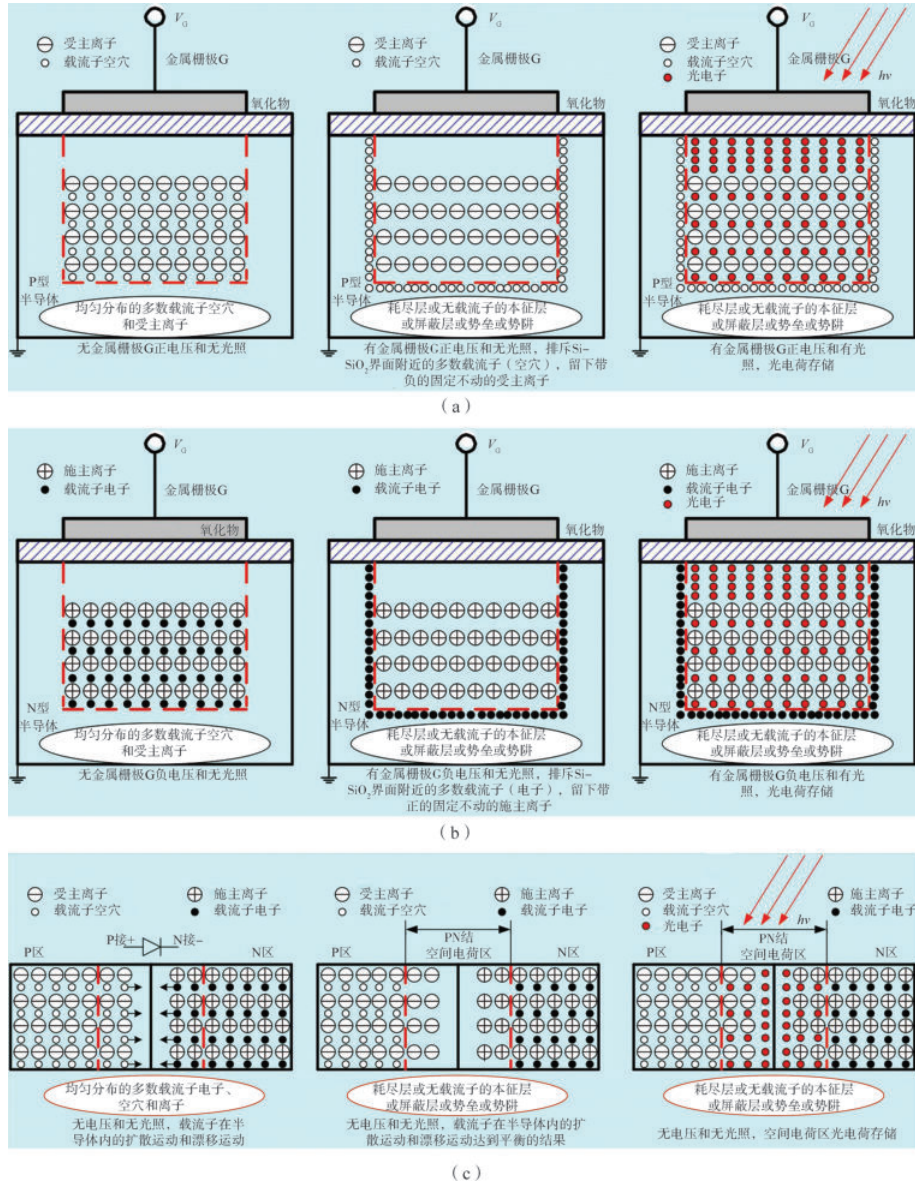


图 3-30 光电二极管与 MOS 电容器的电荷收集过程图

(a) P 型 MOS 电容器 CCD 电荷收集过程图；(b) N 型 MOS 电容器 CCD 电荷收集过程图；

(c) 光电二极管 PD-CCD 电荷收集过程图

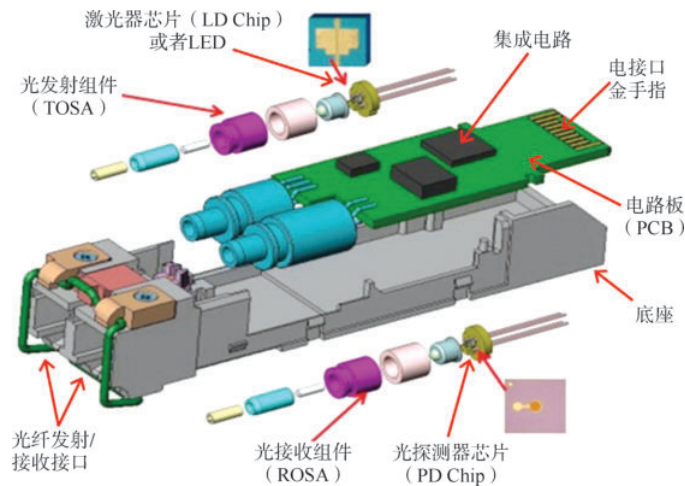


图 4-67 光模块结构示意图 (SFP + 封装)

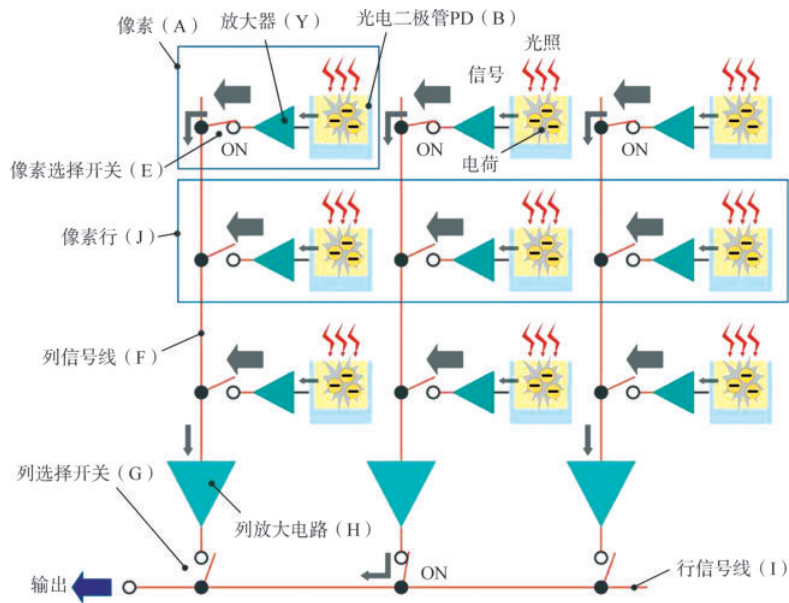


图 5-5 CMOS 传感器的工作原理过程介绍

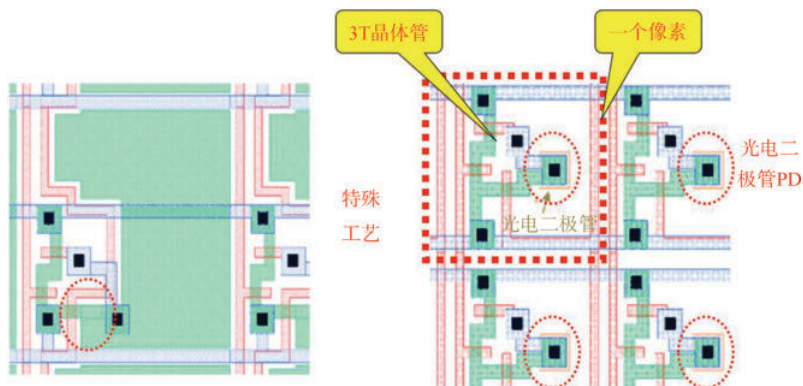


图 5-22 光电二极管型 APS (PD-APS-CMOS) 的结构放大图

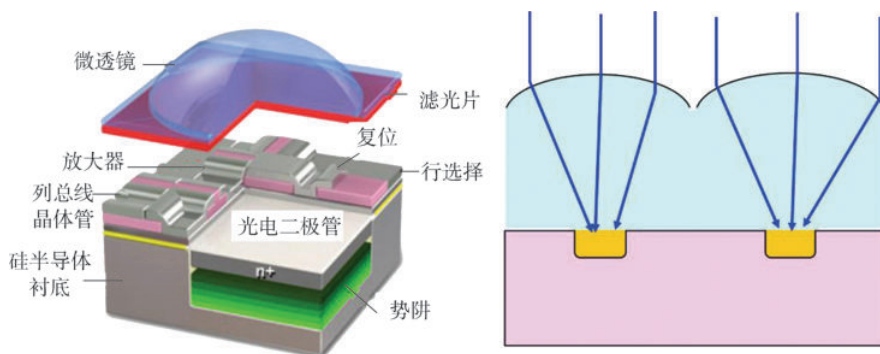


图 5-75 CMOS 传感器像素外部微透镜技术

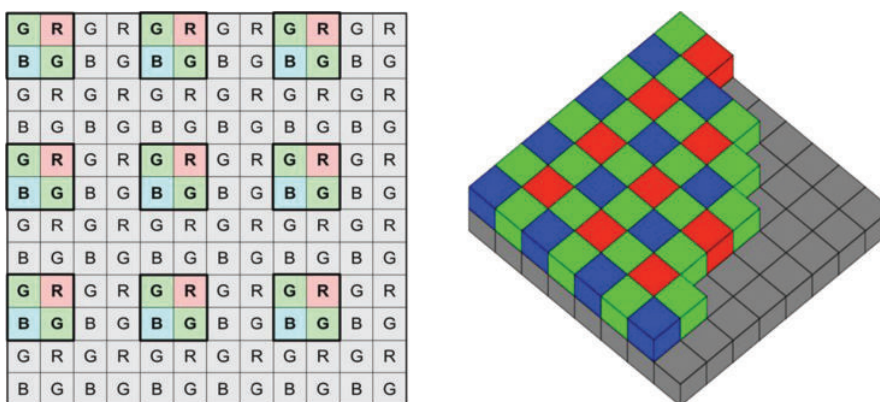


图 5-76 Kodak 公司的 Bayer Pattern 彩色滤光片示意图

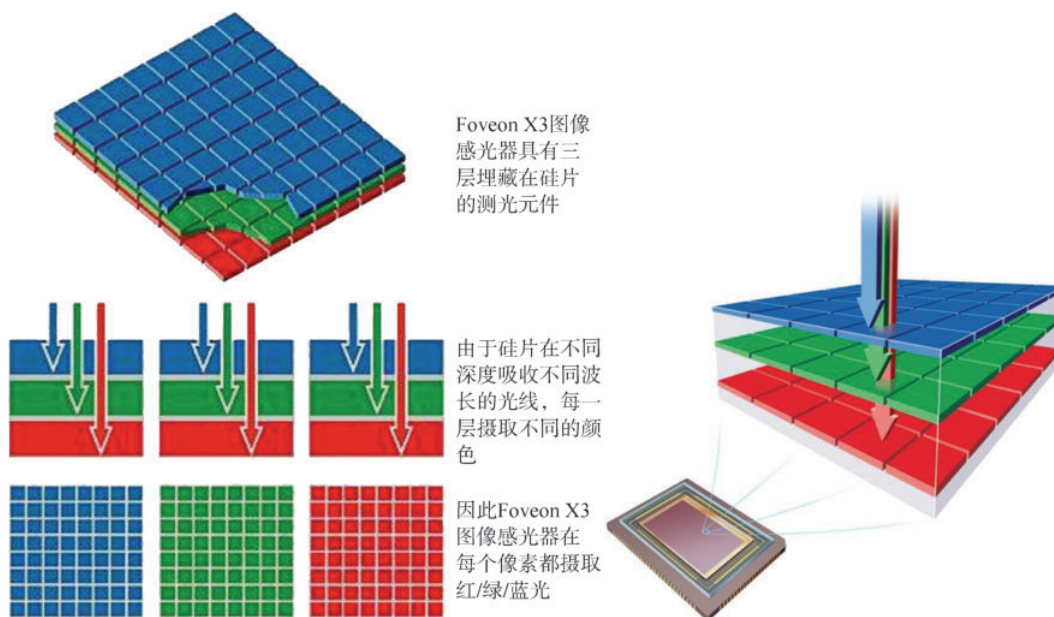


图 5-77 垂直三基色分离式彩色 CMOS 传感器的示意图

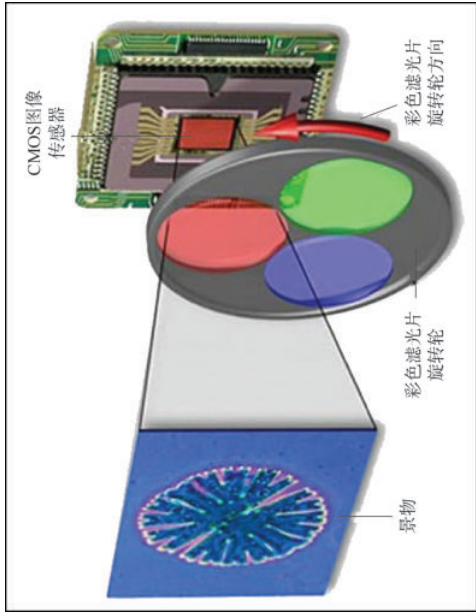


图 5-78 旋转滤光片轮成像示意图

CMOS: 高噪声, 良好图像质量, 但高速

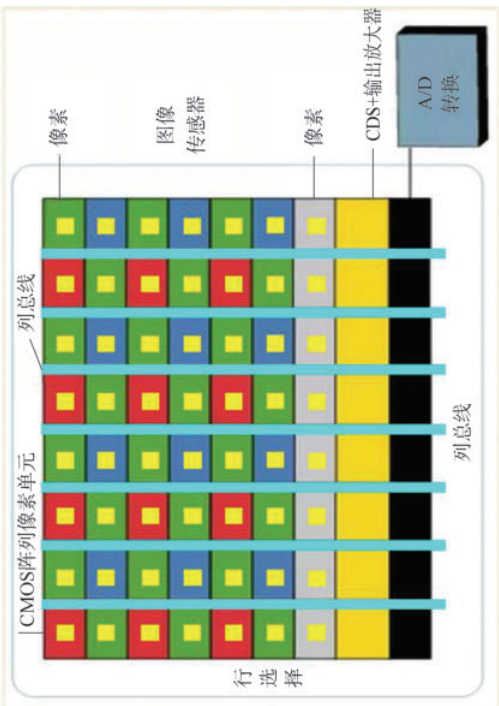


图 7-12 CMOS 传感器结构工作原理图

CCD: 低噪声, 优的图像质量, 但低速

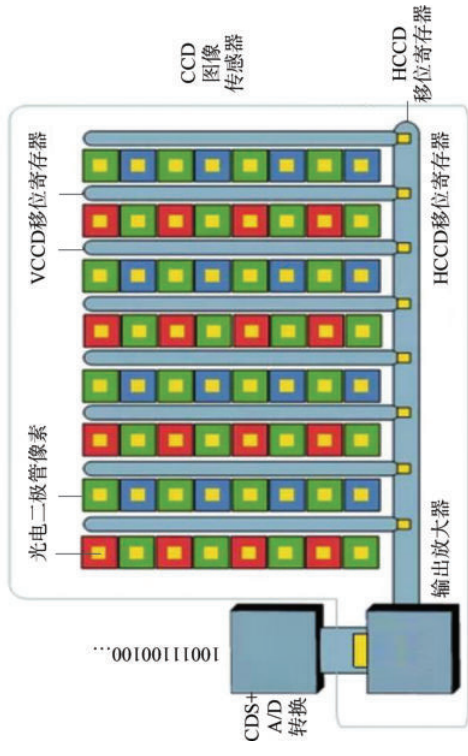


图 7-11 CCD 传感器结构工作原理图

sCMOS: 低噪声, 高灵敏度, 高动态范围, 高速

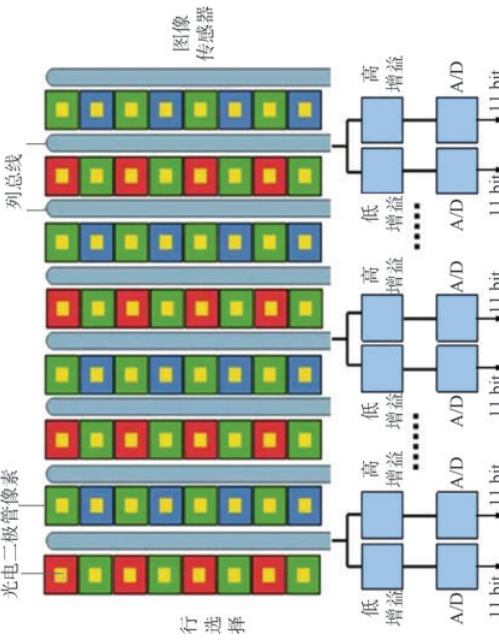


图 7-13 sCMOS 传感器结构工作原理图

1967年，美国科学家 Weckler 与 Noble 发明 CMOS 图像传感器；1969年，美国贝尔实验室的威拉德·波义耳（Willard S. Boyle）和乔治·史密斯（George E. Smith）两位科学家发明 CCD 图像传感器，2009年两位科学家获得 CCD 图像传感器诺贝尔物理学奖。目前，CCD/CMOS 技术已广泛应用于信号处理、数字存储及影像传感等领域。其中，CCD/CMOS 光电成像技术在航天光学遥感、天文学等领域的应用引起了革命性的变化。CCD/CMOS 光电成像技术已成为现代光电子学、测试技术、机器视觉、航天遥感、军用、民用中最活跃、最富有成果的领域之一。

航天光学遥感相机成像技术的发展经历了从胶片相机向实时传输型光电成像相机方向的发展；获取的图像从单一谱段黑白图像向多光谱彩色图像方向发展；实时传输型相机的焦平面组件 FPA 从单片光电探测器向多片光电探测器方向发展；光电成像探测器从 CCD 探测向 TDICCD、TDICMOS、EMCCD、CMOS、sCMOS、CCD/CMOS 混合等探测方向发展；光谱成像探测的通道从单一的可见光通道向可见光、短中长波红外和紫外多通道方向发展。本书作者从事航天光学遥感器设计及研制 30 余年，经常在研究生教学和一些学术会议上说过：“如果我们把航天光学遥感器的镜头比作人们的眼睛，那么 CCD/CMOS 焦平面组件 FPA 就是人们的视网膜”。可见著写一本《航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像技术》书很有必要。本书从航天光学遥感器应用及光电成像技术发展的角度出发，介绍了航天光学遥感器光电焦平面组件 FPA 的技术发展；分析了经典的光电传感器成像理论；介绍了 CCD、CMOS、sCMOS、TDICCD、TDICMOS、EMCCD 等光电图像传感器的基本工作原理；给出了以上光电传感器的性能指标的描述方法；为了设计航天光学遥感器的光电焦平面组件 FPA，列举了大量不同类型的图像传感器及其工作时序驱动电路、相关双采样 CDS 电路、信号处理电路的应用例子；最后，作者利用自己几十余年航天光学遥感器设计研制经历及丰富的博士硕士生教学经验，讲述了航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像应用领域中的新技术，为读者开拓了航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像传感器的应用领域。本书可作为光电技术、光

学工程、应用光学、光学信息工程、光学技术及仪器、光学测绘等专业的本科生及研究生教材，也适用于航天光学遥感器设计及研制、航天飞行器设计等相关专业的工程技术人员阅读。

本书共包括 7 章。第 1 章首先概述地介绍了航天光学遥感器光电 CCD/CMOS 成像技术，包括航天光学遥感卫星发展历程、领域及发展方向，以及国内外航天遥感器焦平面组件 FPA。第 2 章从光电传感器的光电子技术理论出发，介绍了半导体的基本知识、半导体的光吸收、光电器件的物理效应。同时还介绍了航天光学遥感器的光电辐射度学与光度学的概念。第 3 章介绍了 CCD 的基本工作原理，重点介绍了 CCD 的四大方面工作过程：①CCD 光电信号的电荷产生及电荷存储（光注入）；②CCD 电子信号的电荷转移（电注入）；③CCD 电荷的耦合和传输；④CCD 视频信号的读出测量检测。对 CCD 的分类及特性列举了大量 CCD 探测器进行分析，比如拖尾漏光（Smear）、拖影残像（Lag）和 CCD 抗弥散（Anti-Blooming）等，为航天光学遥感器的焦平面组件 FPA 设计提供了理论基础。第 4 章对航天光学遥感器 CCD 成像电路分析和设计进行了介绍。介绍了如何设计一个符合要求的航天光学遥感器的成像电路，包括探测器、高速时钟驱动、空间抗辐照能力、抗弥散能力和相关双采样 CDS 减噪技术。第 5 章介绍了 CMOS 的基本工作原理。从 CMOS 和 CCD 光电探测器的性能比较出发，介绍了 CMOS 传感器的类型、线阵 CMOS、面阵 CMOS、CMOS 探测器内部的外围电路、CMOS 探测器的卷帘和全局曝光快门设计、CMOS 芯片级相机、CMOS 探测器成像中的新技术。第 6 章全面介绍了 CCD/CMOS 图像传感器的主要性能指标，尤其对光电图像传感器的噪声进行了详细的论述和举例，为航天光学遥感器的性能评估及测试提供了帮助。第 7 章介绍了航天 CCD 及 CMOS 成像应用领域中的新技术，包括微光成像应用领域新技术、面阵 CCD/CMOS 推扫式 TDI 成像新技术、成像型短波红外应用领域新技术和特殊谱段成像应用领域新技术。列举了许多新的先进的光电图像传感器探测技术，比如 TDICCD、TDICMOS、EMCCD、sCMOS、InGaAs 短波非制冷传感器。全书开拓了读者的航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电传输技术的视野。

我在下定决心著写本书时，得到了老前辈和航天光学遥感器光电工程专家领导的大力支持和帮助。南京航空航天大学航天学院院长、人民科学家叶培建院士，北京空间机电研究所杨秉新宇航院士，中国航天科技集团总公司陈虎研究员，航天科技集团五院遥感卫星总体部刘兆军研究员，航天东方红卫星有限公司魏建光研究员，北京空间机电研究所李宏宇、王小勇、阮宁娟研究员，南京航空航天大学航天学院季海群、陈金宝、盛庆红教授，中国空间技术研究院神舟学院领导刘皓玉、王劼老师都非常关心本

书的出版工作，在此向他们致以深深的感谢！

本书是在作者的中国空间技术研究院神舟学院和南京航空航天大学博士研究生教学讲义的基础上完善的，全书由中国空间技术研究院北京空间机电研究所主任研究员黄巧林撰写完成。感谢中国空间技术研究院神舟学院和南京航空航天大学航天学院的领导、教学老师。感谢北京空间机电研究所领导，尤其感谢北京空间机电研究所人力资源处领导刘威、冯岩、马国辉、张琳老师，科技委领导陈晓丽、丛振江老师和成像技术总体研究室的领导李强、赵野、孙德伟、王伟之、张孝弘研究员的热情支持和帮助。感谢我的博士生姜伟研究员，中国资源卫星应用中心齐怀川研究员、程芸研究员、夏中秋高工、田国梁高工、齐文雯研究员。感谢我的所有同事！

**黄巧林**

# 目 录

## CONTENTS

---

---

---

<b>第 1 章 绪论</b> .....	001
1.1 航天光学遥感器发展历程及光电成像技术发展方向概述 .....	001
1.1.1 航天光学遥感卫星发展历程 .....	001
1.1.2 航天遥感相机应用发展领域 .....	004
1.1.3 航天遥感相机技术性能发展方向 .....	004
1.2 航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像技术发展概况 .....	004
1.2.1 航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像技术概述 .....	005
1.2.2 法国 SPOT 卫星的 CCD 焦平面组件 FPA 介绍 .....	007
1.2.3 以色列 EROSB 卫星的 TDICCD 焦平面组件 FPA 介绍 .....	008
1.2.4 Kodak 公司先进的卫星 TDICCD 焦平面组件 FPA 介绍 .....	008
1.2.5 美国 WorldView-1/2/3/4-TDICCD 焦平面组件 FPA 介绍 .....	009
1.2.6 美国 LandSat 陆地卫星 CCD 焦平面组件 FPA 介绍 .....	009
1.2.7 欧洲 IMEC 公司多光谱 TDICMOS 焦平面组件 FPA 介绍 .....	009
1.2.8 美国仙童公司科学级 sCMOS 图像传感器介绍 .....	010
1.2.9 国内光学遥感卫星 CCD/CMOS 焦平面组件 FPA 介绍 .....	011
1.2.10 航天光学遥感器 CCD/CMOS 焦平面组件 FPA 的组成 .....	012
1.3 航天光学遥感器 CCD/CMOS 探测及光电成像技术发展趋势 .....	012
1.3.1 航天光学遥感器 CCD/CMOS 图像传感器的发展趋势 .....	012
1.3.2 航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像新技术发展趋势 .....	014
<b>第 2 章 光电传感器的理论物理基础</b> .....	017
2.1 半导体的基础知识 .....	017
2.1.1 导体、半导体和绝缘体 .....	017
2.1.2 半导体的原子结构和共价键 .....	017

2.1.3	本征半导体、空穴及其导电作用 .....	018
2.1.4	非本征半导体：P型和N型半导体 .....	018
2.2	半导体的光吸收 .....	019
2.2.1	能带结构 .....	019
2.2.2	导带、价带与禁带的关系 .....	021
2.2.3	半导体对光的吸收 .....	021
2.2.4	热平衡状态下的载流子 .....	025
2.2.5	非平衡状态下的载流子 .....	032
2.2.6	载流子的扩散与漂移运输 .....	036
2.3	光电传感器的物理效应 .....	039
2.3.1	光电成像系统常用光源 .....	039
2.3.2	光电器件的物理效应分类 .....	040
2.3.3	光生伏特效应理论 .....	041
2.3.4	几种 CCD/CMOS 常用光电探测单元的工作结构原理 .....	050
2.3.5	光电子发射效应理论 .....	053
2.4	航天光学遥感器的光电辐射度学与光度学 .....	055
<b>第3章</b>	<b>CCD 的基本工作原理 .....</b>	<b>057</b>
3.1	CCD 的发展历史 .....	057
3.2	CCD 的结构组成及工作过程 .....	057
3.2.1	CCD 的结构组成 .....	058
3.2.2	CCD 的工作过程 .....	059
3.3	CCD 光生电荷产生及存储（光注入） .....	061
3.3.1	光子对 CCD 传感器的作用 .....	061
3.3.2	CCD 光生电荷产生原理 .....	063
3.3.3	航天光学遥感器 CCD 传感器光生电荷数计算 .....	064
3.3.4	CCD 光电转换的实现 .....	064
3.3.5	CCD 传感器前照与背照特性 .....	065
3.3.6	CCD 电荷收集及存储 .....	069
3.4	CCD 电子信号的电荷转移（电注入） .....	081
3.4.1	电流注入法 .....	081
3.4.2	电压注入法 .....	083
3.4.3	CCD 势阱交互作用电注入法 .....	083
3.5	CCD 电荷的耦合和传输 .....	084
3.5.1	CCD 电荷耦合和传输的机制 .....	084
3.5.2	CCD 电荷耦合和传输原理 .....	085
3.5.3	二相 CCD 电极结构和驱动时钟工作方式 .....	086
3.5.4	三相 CCD 电极结构和驱动时钟工作方式 .....	089

3.5.5	四相 CCD 电极结构和驱动时钟工作方式	090
3.5.6	二相、三相和四相 CCD 电极结构比较	093
3.6	CCD 视频信号的读出测量检测	094
3.6.1	CCD 电荷的读出测量检测基本原理	094
3.6.2	电流输出	095
3.6.3	浮置扩散放大器 FDA 输出	096
3.6.4	浮置栅放大器 FGA 输出	098
3.6.5	浮置扩散 FD 和浮置栅 FG 电容模式分析	099
3.6.6	三种 CCD 视频信号的读出测量检测方法性能比较	101
3.7	航天光学遥感器 CCD 的工作分类	101
3.7.1	线阵 CCD 传感器	101
3.7.2	面阵 CCD 传感器	105
3.7.3	时间延迟积分 TDICCD 传感器	115
3.8	面阵 CCD 的拖尾漏光和拖影残像	122
3.9	航天光学遥感器 CCD 抗弥散	127
<b>第 4 章</b>	<b>航天光学遥感器 CCD 成像电路分析和设计</b>	<b>138</b>
4.1	航天光学遥感器 CCD 成像电路概述	138
4.2	航天光学遥感器 CCD 传感器的选择和设计	139
4.2.1	航天光学遥感器 CCD 焦平面组件设计特点	139
4.2.2	航天光学遥感器 CCD 传感器设计	139
4.2.3	航天光学遥感器 CCD 空间抗辐照能力设计	146
4.2.4	航天遥感相机抗弥散成像能力设计	148
4.3	航天光学遥感器 CCD 焦平面组件 FPA 设计	149
4.3.1	航天光学遥感器 CCD 焦平面组件 FPA 概述	149
4.3.2	TDICCD 焦平面组件 FPA 拼接方法设计	149
4.3.3	TDICCD 焦平面组件 FPA 拼接的像倾斜对 MTF 的影响	151
4.3.4	航天遥感相机 TDICCD 焦平面组件 FPA 温度控制设计	152
4.4	航天遥感相机 CCD 焦平面组件 FPA 驱动电路设计	153
4.4.1	航天光学遥感器 CCD 焦平面组件驱动电路概述	154
4.4.2	线阵 CCD 驱动电路分析与设计	155
4.4.3	面阵 CCD 驱动电路分析与设计	157
4.4.4	航天遥感相机 TDICCD 焦平面组件 FPA 驱动电路分析与设计	163
4.5	航天遥感相机 CCD 焦平面组件 FPA 视频信号处理电路设计	164
4.5.1	CCD 焦平面组件 FPA 视频信号处理电路概述	165
4.5.2	航天 CCD 焦平面组件 FPA 输出信号复位噪声分析	165
4.5.3	TDICCD 相关双采样 CDS 技术的基本原理分析	168
4.5.4	TDICCD 相关双采样 CDS 电路设计	171

4.5.5	新型高速低功耗 TDICCD 视频信号处理电路集成设计 .....	172
4.5.6	几种航天光学遥感 TDICCD 集成视频处理器介绍 .....	173
4.6	航天遥感相机 CCD 焦平面组件 FPA 数字信号传输数据接口设计 .....	181
4.6.1	LVDS 传输数据接口设计 .....	181
4.6.2	CameraLink 传输数据接口设计 .....	182
4.6.3	TLK2711 传输数据接口设计 .....	183
4.6.4	TLK3118 传输数据接口设计 .....	184
4.6.5	光纤传输数据接口设计 .....	185
<b>第 5 章</b>	<b>CMOS 的基本工作原理 .....</b>	<b>188</b>
5.1	CMOS 图像传感器的发展历史和概况 .....	188
5.1.1	什么是 CMOS .....	188
5.1.2	CMOS 图像传感器的发展历史 .....	189
5.1.3	CCD 和 CMOS 图像传感器的比较 .....	189
5.2	CMOS 传感器的结构组成及工作原理 .....	191
5.2.1	CMOS 传感器的结构组成 .....	191
5.2.2	CMOS 传感器的工作原理 .....	193
5.3	CMOS 传感器的像素和像素阵列 .....	195
5.3.1	CMOS 图像传感器像素概述 .....	195
5.3.2	CMOS 像素与 CCD 像素的区别 .....	196
5.3.3	CMOS 像素的光电荷产生及收集结构原理 .....	197
5.3.4	CMOS 像素的光电转换特性 .....	198
5.3.5	PPS 无源被动像素传感器 .....	199
5.3.6	3T-APS 经典有源主动像素传感器 .....	201
5.3.7	4T-APS 经典改进型有源主动像素传感器 .....	202
5.3.8	其他几种有源主动像素传感器 .....	203
5.3.9	CMOS 图像传感器像素的比较 .....	214
5.3.10	线阵 CMOS 和面阵 CMOS 图像传感器 .....	215
5.4	CMOS 传感器像素阵列的外围电路 .....	217
5.4.1	CMOS 传感器 X-Y 像素寻址电路 .....	217
5.4.2	CMOS 传感器相关双采样 CDS 电路 .....	219
5.4.3	CMOS 传感器固定图形噪声 FPN 抑制电路 .....	220
5.4.4	CMOS 传感器 A/D 转换电路 .....	222
5.5	CMOS 传感器的曝光快门设计 .....	223
5.5.1	卷帘式快门 .....	224
5.5.2	全局式快门 .....	229
5.6	CCD/CMOS 芯片级相机 .....	238
5.6.1	CCD 芯片组成的相机 .....	238

5.6.2	CMOS 芯片级相机 .....	238
5.7	航天光学遥感器 CMOS 传感器成像中的新技术 .....	239
5.7.1	TDICMOS 时间延迟积分技术 .....	239
5.7.2	混合智能化电路集成探测成像技术 .....	244
5.7.3	高性能背照 CMOS 传感器技术 .....	245
5.7.4	高填充因子技术 .....	246
5.7.5	彩色 CMOS 传感器技术 .....	248
5.8	航天光学遥感器 CMOS 器件及应用 .....	250
<b>第 6 章</b>	<b>航天光学遥感器 CCD/CMOS 传感器的主要性能指标 .....</b>	<b>252</b>
6.1	CCD/CMOS 图像传感器的性能指标概述 .....	252
6.2	CCD/CMOS 光电探测功能 .....	253
6.2.1	半导体光电吸收 .....	253
6.2.2	电荷转移效率 .....	254
6.2.3	像元满阱度 .....	254
6.2.4	像元尺寸及像元中心距 .....	254
6.2.5	电荷收集效率 .....	255
6.2.6	电荷转换效率 .....	255
6.2.7	饱和输出电压 .....	255
6.3	CCD/CMOS 光电转换特性 .....	256
6.3.1	量子效率 .....	256
6.3.2	填充因子 .....	257
6.3.3	光电转换效率 .....	257
6.3.4	响应度 .....	257
6.3.5	感光度或者灵敏度 .....	258
6.3.6	信噪比 .....	259
6.3.7	饱和等效曝光量 .....	260
6.3.8	噪声等效曝光量 .....	260
6.3.9	动态范围 .....	260
6.3.10	线性度 .....	261
6.3.11	串扰 .....	261
6.4	CCD/CMOS 图像传感器的噪声 .....	262
6.4.1	空域固定图形噪声 .....	263
6.4.2	时域随机或者瞬态噪声 .....	266
6.4.3	图像质量噪声 .....	269
6.5	CCD/CMOS 图像传感器阵列的性能 .....	272
6.5.1	传递函数 .....	272
6.5.2	电子快门 .....	272