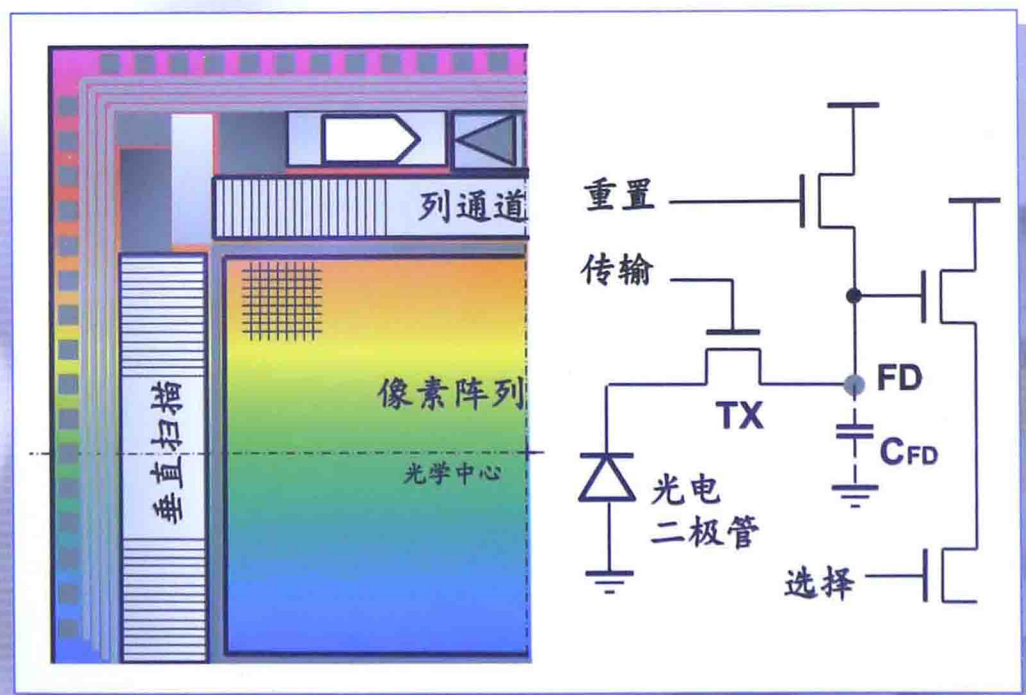


CMOS

图像传感器集成电路

——原理、设计和应用

◎ 罗 昕 编著



微电子与集成电路丛书

CMOS 图像传感器集成电路 ——原理、设计和应用

罗 昕 编著

電子工業出版社.

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书尽量全面地叙述 CMOS 图像传感器集成电路芯片的原理、结构、应用、设计方法和流程。第 1 章讲述有关技术背景和发展历程、CMOS 图像传感器的特点和应用。第 2 章讲述 CMOS 图像传感器集成电路的基本结构和主要技术指标, 简述 CMOS 工艺技术和 VLSI 设计方法和流程。第 3 章描述有源像素传感器 APS。第 4 章讲述 CMOS 图像传感器的像素阵列结构和原理, 以及阵列的各种曝光操作模式。第 5、6 两章讲述像素阵列的读出、曝光控制、图像信号的高速模数转换和图像数据传输的子系统方案和电路原理。第 7 章讲述 CMOS 图像传感器版图设计的一些特点, 以及一个全芯片版图布局案例。结束语叙述图像传感器芯片的超大规模集成及其发展前景。

本书面向从事 CMOS 图像传感器集成电路芯片设计的工程师和图像应用系统的项目设计规划者, 以及电子电路与系统专业的学生、模数混合 CMOS VLSI 设计人员和关心现代电子科技发展的人士。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

CMOS 图像传感器集成电路: 原理、设计和应用 / 罗昕编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.9

(微电子与集成电路丛书)

ISBN 978-7-121-24311-0

I. ①C… II. ①罗… III. ①图象传感器—CMOS 电路—集成电路 IV. ①TN432

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 209681 号

责任编辑: 刘海艳 (lhy@phei.com.cn)

印 刷: 北京天来印务有限公司

装 订: 北京天来印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 8.75 字数: 106.5 千字

版 次: 2014 年 9 月第 1 版

印 次: 2014 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1 500 册 定价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言



在当今的图像技术领域，先进的 CMOS 图像传感器已经毫无疑问地成为数字图像信息采集的主流技术。其中的原因不仅仅是其优秀的直接物理性能——灵敏度、光谱、分辨率和动态范围等，更重要的是因为它们是用 CMOS 工艺集成制造的。正是由于这个原因，CMOS 图像传感器才能与各种相关的模拟-数字电路和功能集成在一个单硅片上，从引脚上直接输出数字图像信息；可以直接利用飞速发展的 CMOS 工艺超大规模集成最先进技术成果，实现高清晰度成像和高速图像刷新；可以在众多的晶元厂商试制和生产；还可以利用优秀的 CMOS 超大规模集成电路设计自动化工具和模型，快速和低成本地不断设计出新产品。

正是由于 CMOS 图像传感器的各项优秀特点，数以亿计无处不在的“智能”通信设备才能以拍照和摄像作为必备的功能；而当今世界上凡是重要的事件场合、浮华绚丽的景观或者景色优美的自然风光胜地，到处都充斥着 DSLR 数码相机的闪光和快门咔嚓声。也许在许多数字影院里，被高清画面所震撼的观众中，并没有几个人留意到片尾显示的高清晰度数字电影技术的标志，而那些“震撼”正是采用 CMOS 图像传感器技术带来的结果。你甚



至都不会留意到，从什么时候起你的牙医在用 X 光检查你的牙齿时，不再给你覆盖沉重的铅防护马甲，然后等待牙医助理处理完 X 光胶片——可能还需要重拍；而是直接在计算机屏幕上显示和讨论你的牙齿问题和治疗方案，等等。更不用说在尖端的空间、武器和科研领域，近十年来人类的视觉能力正在迅速地向更高清晰度和更宽广的视域延伸着。

大多数 CMOS 图像传感器集成电路芯片，都是一个单硅片系统（System on a Chip, SoC），而且是模拟-数字混合设计和工艺的范例。从系统、电路到版图设计，直到工艺完成后的硅片，都是电子科学、工程 and 艺术的完美结合。每一个功能正确、性能优秀的成品芯片，都是一件精美的艺术品。CMOS 图像传感器的设计，牵涉许多类型的电子电路，从低噪声的、宽带的到高速的，从模拟的、数字的到传感器的，都涉及很宽的电子电路知识领域。从系统设计、电路设计到 CMOS 半导体工艺，需要设计团队、晶圆厂商密切合作和设计工具软件的支持。CMOS 图像传感器集成电路芯片的设计过程，是现代电子设计的完美典范。

因为 CMOS 图像传感器可以设计成超大规模的系统集成，所以整机和系统的设计师可以考虑在系统中集成图像传感器功能，使其成为与系统紧密结合的一部分，提高系统的电性能、减小体积-重量和获得独立的知识产权。因此 CMOS 图像传感器的工作原理和设计方法不仅仅是集成电路芯片设计师所应学习和探讨的，而且也应该引起有潜在数字摄像功能的项目、系统和整机产品的领导者和系统设计师的关注和兴趣。以便他们在设计新的产



品时，从项目和系统的规划伊始，就考虑加入集成 CMOS 图像传感器的元素，使新设计占据更高的起点。

本书是一本电子电路和系统专业的工程技术专著，试图包含 2010 年以前作者所了解的 CMOS 图像传感器工程技术成果，希望能对有关的电子工程技术人员有所帮助。有关半导体物理和图像科学的原理知识，请阅读 2004 年由奥利·雅迪-派克特和拉尔夫·艾蒂安-卡明斯编著的《CMOS 成像器：从光电导到图像处理》（CMOS Imagers: From Phototransduction to Image Processing, Orly Yadid-Pecht and Ralph Etienne-Cummings, 2004）一书，那是一本 CMOS 图像传感器技术在第一个十年的优秀论文汇编，是这个领域的经典著作。

目 录



第 1 章 概述	1
1.1 图像传感器的一般概念	1
1.2 图像传感器技术的发展历程	3
1.2.1 电子管时代和图像扫描技术	3
1.2.2 CCD 图像传感器和像素概念	6
1.2.3 CMOS 图像传感器	10
1.3 CMOS 图像传感器的特点	11
1.3.1 有源像素传感器	11
1.3.2 CMOS 图像传感器的集成	12
1.3.3 CMOS 系统集成和数字图像革命	13
1.4 CMOS 图像传感器的应用	14
1.4.1 数字电视和视频摄像	14
1.4.2 静止图像数码照相机	15
1.4.3 移动通信和便携设备的摄像功能	17
1.4.4 高清晰度数字电影摄像技术	17
第 2 章 CMOS 图像传感器系统	20
2.1 CMOS 图像传感器的基本结构	20



2.1.1	CMOS 图像传感器的框图	20
2.1.2	CMOS 图像传感器芯片的封装	22
2.2	CMOS 图像传感器的性能	23
2.2.1	光电转换的原理和性能	23
2.2.2	图像清晰度	25
2.2.3	图像刷新速率和高速摄影	26
2.2.4	图像数据的字长	27
2.3	CMOS 超大规模集成简述	27
2.3.1	CMOS 器件的基本结构和原理	28
2.3.2	CMOS 工艺和版图	32
2.3.3	CMOS 超大规模集成的设计方法学	35
第 3 章	有源像素传感器	41
3.1	基本有源像素传感器	41
3.1.1	3T-APS 电路原理	41
3.1.2	3T-APS 版图	43
3.1.3	像素的填充系数	44
3.2	4T-APS 像素	46
3.2.1	埋入型光电二极管	46
3.2.2	3T-APS 的输出电压问题	46
3.2.3	4T-APS 原理	47
3.2.4	4T-APS 电路和版图	49
3.3	5T-APS 像素	50
3.4	像素的光学结构	52
3.4.1	光遮蔽和滤光层	52



3.4.2	微透镜	53
3.4.3	背光微像素结构	54
第 4 章	像素阵列和电子快门	55
4.1	像素阵列结构	55
4.1.1	像素排列和图像分辨率	55
4.1.2	阵列中像素的互连	57
4.2	阵列的电子快门曝光	59
4.2.1	滚动快门曝光	59
4.2.2	全局快门曝光	62
4.3	图像阵列信号的读出	66
4.3.1	像素阵列的列读出	66
4.3.2	像素和阵列读出速率	68
4.3.3	并行列读出	69
4.4	阵列的选择曝光读出	71
4.5	彩色图像的获得	74
4.5.1	拜尔彩色阵列	74
4.5.2	弗翁彩色图像传感器	75
第 5 章	像素阵列曝光读出电路	78
5.1	像素阵列读出电路	78
5.1.1	固定图案噪声	78
5.1.2	相关双取样原理	80
5.1.3	CDS 读出电路原理	81
5.1.4	4T-APS 像素阵列的 CDS 读出电路	84
5.2	像素阵列曝光读出控制	86



5.2.1	像素阵列曝光读出时序	86
5.2.2	译码型扫描电路	87
第 6 章	图像信号的模数转换和数据传输	93
6.1	图像信号的高速模数转换	93
6.1.1	逐次逼近数模转换电路原理	93
6.1.2	直接比较高速模数转换电路	96
6.1.3	高速逐次逼近模数转换电路	97
6.1.4	图像高速模数转换电路的系统设计	100
6.2	图像数据的高速传输	100
6.2.1	高速图像数据传输的系统设计	100
6.2.2	高速图像数据差分传输	102
第 7 章	CMOS 图像传感器芯片版图设计	106
7.1	混合 CMOS 芯片版图	106
7.2	隔离	107
7.2.1	PN 结隔离	107
7.2.2	深阱隔离	108
7.3	集成电容器	109
7.3.1	MOS 电容器	110
7.3.2	MiM 电容器	111
7.4	CMOS 图像传感器芯片版图布局	112
结束语		115
附录 A	术语索引	117
参考文献		126

第 1 章 概 述

1.1 图像传感器的一般概念

图像传感器是把光学图像信息转换成电信号的器件。光学图像信息一般是指在可见光谱范围，物体本身辐射或反射光源照射所产生光辐射的能量分布，对于人类和动物而言就是“视觉”。视觉是感知和描述事物物理存在的最重要、最直接和最普遍的途径之一，地球上的动物普遍使用视觉感知自己、彼此和周围环境事物的存在，尽管不同的动物所感知的辐射光谱和能量强度范围随物种不同而有差别。人类的智慧使人类不满足于仅仅感知事物，而且希望和需要客体物理地，而非生理和心理地记录、重现和传输图像信息，从而达到在不同时间和地点分享图像信息的目的。绘画曾经是数千年来也许是上万年以来人类所掌握的实现这个目标的最原始手段之一。19 世纪发明的照相术是将光学图像信息成像和记录在涂敷了卤化银材料胶片上的技术，在胶片上成像的光能量使卤化银材料发生化学变化，使其透光特性对应于入射光谱和光能量强度，实现了记录光学图像信息的功能，然后用白光光源照射成像后的胶片，通过光学透镜系统在屏幕上或相纸上重现所记录下来的光学图像。20 世纪人类发明了电视技术，用电子学的方法获取、记录、传输和重现光学图像信息。在电子图像处理过程中，“获取”是图像信息来源的第一个步骤，因而是决定最后重现图像品质的首要环节，而用于“获取”图像信息的电子器件

就是图像传感器。

电子学的图像传感器来源于广义的光电转换传感器，并可以被认为其中被最广泛应用的一种。被总称为光电转换传感器的电子器件按照被转换的光学信息空间性质分类，可以划分为转换一个点上的光学信息、转换一条直线上的一维光学信息和转换一个平面上的二维光学图像信息。而它们之间的差别首先在于被转换光能量的空间几何形状：“点”的，可以忽略其面积的一个独立空间坐标；“线”的，分布在一条有限长度直线上的一系列“点”；以及“面”的，一个二维的空间平面图像。这三种光电转换传感器有不同的电信号特征：在“点”光电传感器上被转换的是微小面积上光能量总和，它被转换成单一电信号值或其随时间的变化；一维传感器是把沿传感器长度上光能量的分布，转换成一串电信号值或它们随时间的变化；二维的图像传感器是把一个空间平面上光能量的二维分布信息（即图像信息），转换成一帧电信号值的集合或它们随时间的变化。“点”光电传感器被广泛应用于光强度的测量、光纤通信和感知物体的位置和数量等领域；一维光电传感器用于条码识别和扫描仪；二维光电传感器，即图像传感器就是本书要讨论的对象，被广泛应用于静止图像的摄影及连续图像的电视、视频和电影的摄像。图 1.1 所示为“点”的、一维“线”的和二维平面图像的光电转换传感器。上述三种类型的光电转换器件，在相同的光谱和光能量范围应用中，往往采用相同的或类似的光电转换物理原理。比如“点”光电传感器可以是一个硅光电二极管，“线”光电传感器可以是排列成一行的若干硅光电二极管，而图像传感器可以是排列成一个二维平面的硅光电二极管矩阵。

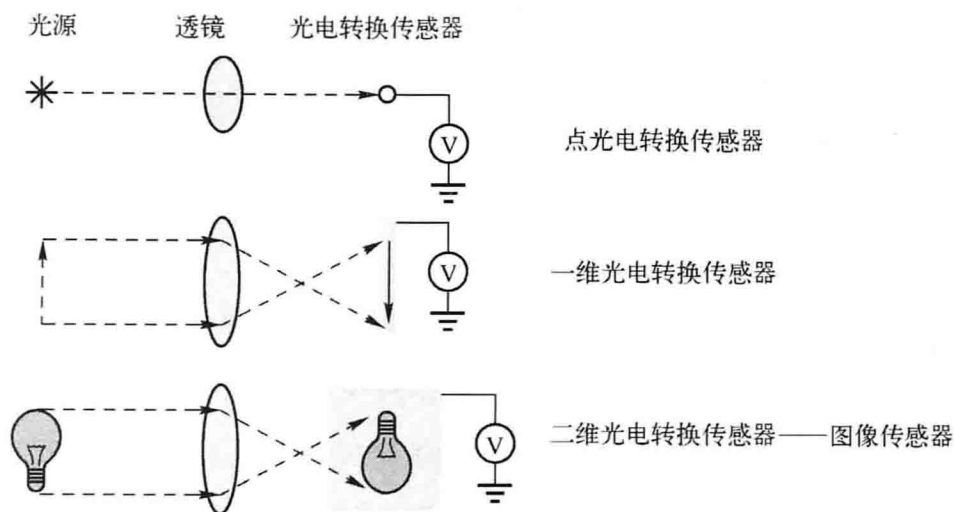


图 1.1 光电转换传感器示意图

在当今世界上，图像传感器的最新技术成就已经推动了数字图像技术在各个领域的广泛应用。本书所讨论的 CMOS 图像传感器，就是近十年来在图像传感领域最具影响力的技术进步之一，是推动数字图像革命的最关键技术之一。

1.2 图像传感器技术的发展历程

1.2.1 电子管时代和图像扫描技术

图像传感器是随着电视技术在 20 世纪 30 年代发展起来的，最早期的电视实验使用“点”光电传感器实现光电转换，然后用机械扫描来实现二维图像的信号获取和重现。电子管图像传感器从早期的正析像管到电视摄像管，各代产品已经具备了现代图像传感器的最基本结构要素和功能。它们被使用和发展了近 60 年，直到 20 世纪 80 年代，推动了第一代模拟电视技术及其应用的发展。早期图像传感器技术的最重要贡献在于建立了扫描（Scan）

的概念，用扫描的方法把二维空间平面上的光电信息离散成行（Line）和帧（Frame），然后按空间顺序读出形成在一维时间轴上变化的电信号。这个一维的电信号经过存储和传输，再用扫描的方式还原重建二维平面图像。扫描概念一直被沿用至今，也被应用到本书所讨论的最新 CMOS 图像传感器技术中。

电子管的图像扫描是用电子束实现的，一个电视摄像管的原理结构示意图如图 1.2 所示。在密封的真空管中由电子枪发射出一束电子，电子枪中的热电子发射阴极产生电子，电子枪的高电压静电场把电子会聚成一束并加速射出。经过偏转线圈磁场的驱动，这个聚焦的电子束在光电转换平面上形成水平的和垂直的“扫描”。在光电图像转换平面上涂敷了半导体光电导材料，被摄物体的光学图像通过透镜光学聚焦，成像在这个光电转换平面上与电子枪相对的另一面。这个平面受入射光照射，产生与图像光照强度对应的光导电动势的二维平面分布。

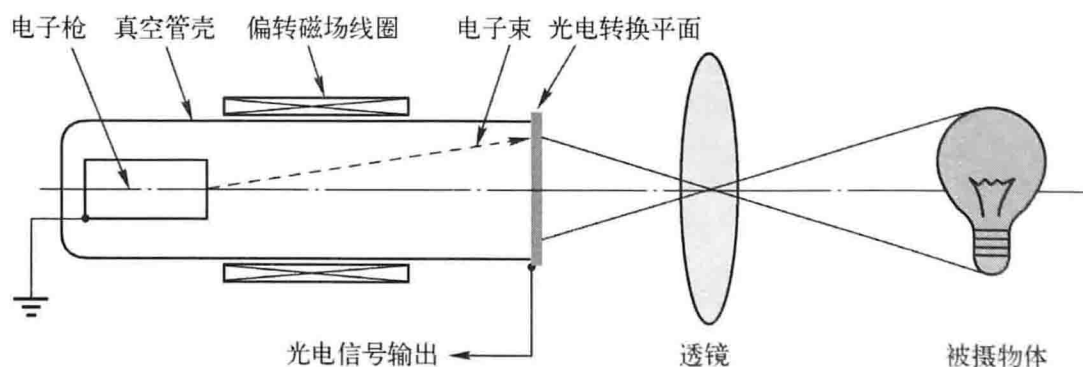


图 1.2 电子管光电图像传感器结构示意图

如图 1.3 所示，电子束扫描顺序地读出这个光电转换平面上的光导电动势分布，形成随时间变化的一维电信号。光电转换平

面制作在一个精确的光学玻璃窗平面上，这个玻璃窗与真空管管壳熔封在一起形成整个器件的真空密封。玻璃窗的内侧制作一个光学透明的导电薄膜，在薄膜上制作半导体光电导材料的光电转换平面，电子束聚焦扫描在这个平面上，电信号就从导电薄膜引出。电子束通过电子枪和阴极实现信号接地，当电子束聚焦扫描到平面上某一坐标点时，从导电薄膜上输出的就是这一点的光导电动势，其等效电路示意在图 1.3 的左下方。当电子束扫描运动经过转换平面上所有的坐标点以后，整幅画面的光电信息就全部读出。图中读出信息的电子扫描轨迹如画面上的实线所示意，虚线表示“回扫”的轨迹，在回扫的时间段电子束是被控制关闭的。在水平方向的一次画面宽度的读出扫描，被称为一行。垂直方向的扫描使每一行的扫描轨迹沿垂直方向移动一个增量，当一幅画面被完全扫描之后，电子束又“回扫”返回到一帧开始的原出发点，完成一帧图像信息的读出。

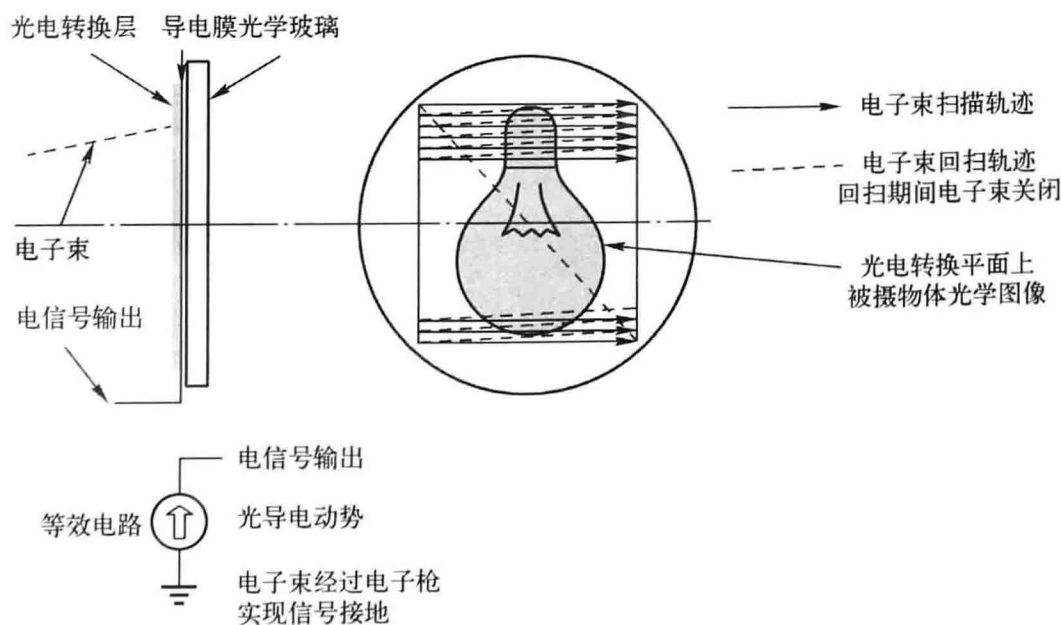


图 1.3 电子管光电图像传感器的光电转换平面

在电子管图像传感器近 60 年的发展应用过程中,光电转换平面的半导体材料在不同的发展阶段和不同的应用领域,有多种不同的化学物理构成,如氧化铅、硒砷碲、硫化锑等半导体化合物。在电子管世代发展的最后阶段,开始引入硅光电二极管阵列作为光电转换平面制造出硅摄像管。现代固体电子图像传感器件也都沿用了硅光电二极管阵列转换平面,但是不再采用电子束扫描来引出图像电信号了。

1.2.2 CCD 图像传感器和像素概念

电荷耦合器件 (Charge Couple Device, CCD) 图像传感器是在 20 世纪 70 年代研究和发明的,它包含了电子学的两个方面重大技术成就:像素 (Pixel) 及其阵列和电荷耦合技术。这种传感器使用硅光电二极管做转换元件,一个光电二极管作为一个像素,如图 1.4 所示,由 M 个水平像素和 N 个垂直像素数正交排列形成像素阵列。被摄物体的光学图像就聚焦成像在这个阵列平面上,每一个光电二极管像素转换出一个光导电动势值,对应于这个像素在阵列坐标位置上的光照强度。阵列上所有像素输出电动势值的集合,就是一幅完整图像的全部信息。像素阵列检测出来的,具有确定坐标的光能量值集合,使图像信息实现了在成像平面上的离散化,为下一步把每个像素的模拟检测值量化成二进制数,最后形成数字图像数据打下基础。这种像素阵列结构,同样被应用在本书将讨论的 CMOS 图像传感器上。

CCD 图像传感器的另一个技术成就在于,用电荷耦合结构扫描读出每个像素上的电信号。在当时的技术条件下,正是由于 CCD 结构可以转移出阵列中的电荷信息,才推动了像素阵

列在图像传感器领域的应用。在一个 CCD 像素的光电二极管上, 入射的光子能量激发出对应其光照强度的载流子电荷信号, 然后由电荷耦合结构把电荷信号按行列顺序转移出光电传感器阵列。最后这个转移出来的电荷信号经过电荷-电压转换电路转换成模拟电压信号, 再用常规的模拟电子电路实现放大和处理。

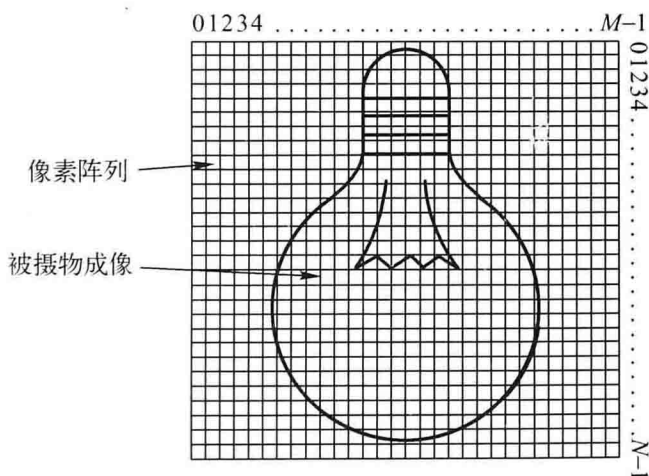


图 1.4 $M \times N$ 像素阵列示意图

图 1.5 所示为一个电荷耦合结构, 在 P 型硅半导体上等距离排列电荷耦合时钟的矩形导体电极, 电极可以是金属或多晶硅材料的。电极的下方由二氧化硅薄膜在电极和 P 型半导体之间形成绝缘, 被转移传输的信号电子负电荷就存储在电极下方的半导体区域中。在相邻的时钟导体电极上按顺序连接三相时钟信号 ϕ_0 、 ϕ_1 和 ϕ_2 , 被转移的电荷按照电极上时钟电位的变化, 实现在半导体区域中从左向右的转移。电荷信号按如下过程实现转移: