

智能结构和材料

3.1 简介

智能 CMOS 图像传感器会在芯片上使用智能像素、结构和材料。此外,专用的像素排列方法和光学元件也会应用在智能 CMOS 图像传感器中。本章首先对各种智能像素、结构和材料进行概述,然后介绍应用于智能 CMOS 图像传感器的专用像素阵列和光学元件。

如 2.6.2.1 节所述,在传统的 CMOS 图像传感器中,像素的输出为一个模拟电压信号,由源极跟随器(SF)产生。然而,为了实现某些智能功能,人们开发出了其他几种类型的像素,如模拟电流型、脉冲信号输出型以及数字信号输出型。之后智能像素内容的章节会介绍这三种输出型的像素。首先介绍模拟输出型像素,随后介绍脉冲和数字输出型像素,其中脉冲输出型像素综合了模拟和数字处理方法。

本章的第二部分介绍针对某些特定的 CMOS 图像传感器使用的结构和材料,这与标准硅 CMOS 技术有所不同。随着近年来大规模集成电路技术的发展,许多新的材料和结构被提出,例如绝缘体上硅(SOI)技术、蓝宝石上硅(SOS)技术、3D 集成技术,以及 SiGe 和 Ge 等许多其他材料的使用。这些新结构和新材料的使用能够增强智能 CMOS 图像传感器的性能和功能。表 3.1 列举这些结构和材料及对应的特性。

表 3.1 智能 CMOS 图像传感器的结构与材料

结构/材料	特 性
SOI	同时使用 NMOS 和 PMOS 时面积较小
SOS	透明衬底(蓝宝石)
3D 集成	大填充因子,信号处理集成
多路径, SiGe/Ge	长波长(NIR)

本章的最后部分介绍应用于智能 CMOS 传感器的专用像素排列方法和光学元件。

3.2 智能像素

本节介绍用于智能 CMOS 图像传感器的不同像素结构,即智能像素。智能像素结构不

同于传统的有源像素传感器。根据输出模式的不同可以将其分为三种：首先介绍模拟型像素；随后介绍了脉冲调制型像素,包括脉冲宽度调制和脉冲频率调制；最后介绍单光子雪崩二极管(2.3.4.1节提到的)。

3.2.1 模拟型像素

有源像素传感器是典型的应用于模拟处理的像素。接下来不仅介绍传统的 APS 类型,还将介绍电流型像素、对数传感器、电容跨阻放大器(CTIA)型像素以及锁定型像素等内容。

3.2.1.1 电流型像素

传统的 APS 输出一个电压信号。但由于电流信号很容易根据基尔霍夫电流定律实现加和减,因此电流型像素能更方便地进行信号处理。对于一个算术单元来说,使用电流镜电路很容易实现乘法,它也可以通过一个比值大于 1 的电流镜来实现光电流的倍增。注意,这种方法引入了像素固定模式噪声。

电流型像素中,可以使用电流复制电路来实现存储功能^[168]。这里同时介绍了电流型的固定模式噪声抑制和模数转换器^[169]。电流型像素分为直接输出模式和累积模式两类输出模式。

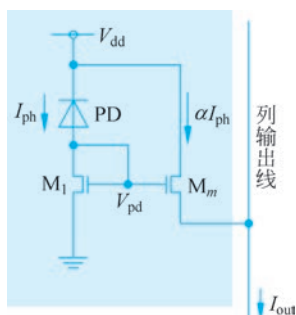


图 3.1 使用电流镜的像素基本电路结构

注: $M_1 \sim M_m$ 的宽长比为 α , 所以电流镜的输出等于 αI_{ph} 。

直接模式。在直接输出模式的像素中,光电流直接从光电探测器输出,这种光电探测器可以是光电二极管或者光电晶体管^[170-171]。从光电二极管中产生的光电流通常使用电流镜来传输,以此实现电流倍增(或不倍增)。一些早期的智能图像传感器普遍采用光电晶体管和电流镜来实现电流形式的输出。如前所述,电流镜的比值通常用来放大输入电流,然而这种结构在低光照水平下会导致灵敏度降低,并且电流镜失配所导致的固定模式噪声会很大。使用电流镜的像素基本电路结构如图 3.1 所示。

累积模式。图 3.2 显示了电流模式 APS 的像素基本结构^[172-173]。APS 结构与直接输出结构相比,图像质量有所提高,其像素的输出可以用下式表示:

$$I_{pix} = g_m (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (3.1)$$

式中: V_{gs} 和 g_m 分别是晶体管 M_{SF} 的栅源电压和跨导。

在复位阶段,光电二极管节点电压为

$$V_{reset} = \sqrt{\frac{2L_g}{\mu C_{ox} W_g}} I_{ref} + V_{th} \quad (3.2)$$

当光照入射至光电二极管时,光电二极管节点电压变为

$$V_{PD} = V_{reset} - \Delta V \quad (3.3)$$

式中

$$\Delta V = \frac{I_{ph} T_{int}}{C_{PD}} \quad (3.4)$$

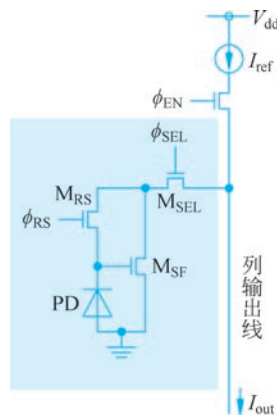


图 3.2 电流模式 APS 的基本电路结构

其中: T_{int} 为累加时间。

这和电压模式 APS 的相同。因此,输出电流可表示为

$$I_{\text{pix}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{\text{ox}} \frac{W_g}{L_g} (V_{\text{reset}} - \Delta V - V_{\text{th}})^2 \quad (3.5)$$

于是,差动电流可以表示为

$$I_{\text{diff}} = I_{\text{ref}} - I_{\text{pix}} = \sqrt{2 \mu_n C_{\text{ox}} \frac{W_g}{L_g} I_{\text{ref}} \Delta V} - \frac{1}{2} \mu_n C_{\text{ox}} \frac{W_g}{L_g} \Delta V^2 \quad (3.6)$$

注意,由于晶体管 M_{SF} 的阈值电压被抵消,改善了源于阈值电压变化的固定模式噪声,详细的介绍见文献[172]。

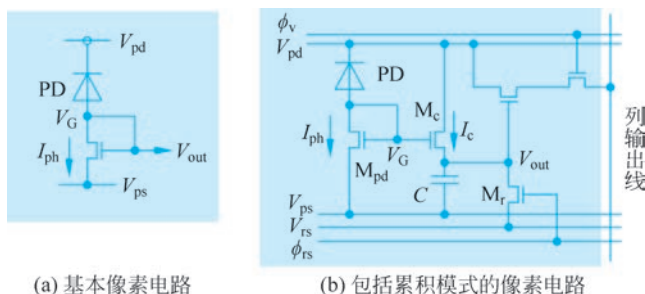
3.2.1.2 对数传感器

传统的图像传感器对输入光照度的响应是线性的,而对数传感器则基于 MOSFET 的亚阈值工作模式进行工作,亚阈值工作模式的解释见附录 F。对数传感器像素使用电流直接输出模式,因为当光电流小到使晶体管进入亚阈值区域时,电流镜的结构就是对数传感器结构。对数传感器主要应用于宽动态范围图像传感器^[174-177],它最初由 Chamberlain 和 Lee 在 1984 年提出并证明^[178]。4.4 节将介绍宽动态范围图像传感器。

图 3.3 显示了对数 CMOS 图像传感器的基本像素电路结构。在亚阈值区域, MOSFET 的漏电流 I_d 非常小并随着栅电压 V_g 呈指数增长:

$$I_d = I_o \exp \left[\frac{e}{mk_B T} (V_g - V_{\text{th}}) \right] \quad (3.7)$$

式(3.7)的推导和参数的意义查看附录 F。



(a) 基本像素电路

(b) 包括累积模式的像素电路

图 3.3 对数 CMOS 图像传感器的像素电路^[179]

在图 3.3(b)的对数传感器中,有

$$V_G = \frac{mk_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{\text{ph}}}{I_o} \right) + V_{\text{ps}} + V_{\text{th}} \quad (3.8)$$

这种对数传感器结构采用了累积模式。

M_C 的漏电流可表示为

$$I_c = I_o \exp \left[\frac{e}{mk_B T} (V_G - V_{\text{out}} - V_{\text{th}}) \right] \quad (3.9)$$

由于电流 I_c 对电容 C 充电,从而 V_{out} 随时间的变化可表示为

$$C \frac{dV_{\text{out}}}{dt} = I_c \quad (3.10)$$

将式(3.8)代入式(3.9),可得

$$I_c = I_{ph} \exp \left[\frac{e}{mk_B T} (V_{out} - V_{ps}) \right] \quad (3.11)$$

将式(3.11)代入式(3.10)后积分,则输出电压可表示为

$$V_{out} = \frac{mk_B T}{e} \ln \left(\frac{e}{mk_B T C} \int I_{ph} dt \right) + V_{ps} \quad (3.12)$$

尽管对数传感器具有超过 100dB 的宽动态范围,但它也有一些缺陷,例如与 4T-APS 相比,对数传感器光敏性差,尤其是在低光照条件下。由于工作于亚阈值区使得响应缓慢,会造成比较大的器件特性偏差。

3.2.1.3 电容跨阻放大器型像素

传统 APS 的每个像素都有一个源极跟随器作为放大器,其电流负载被置于一列中,源

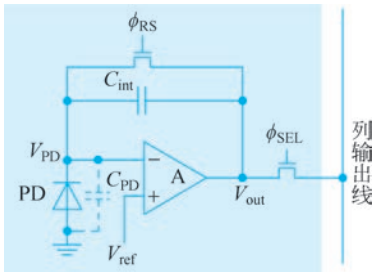


图 3.4 具有一个电容跨阻放大器的像素电路^[182]

极跟随器放大器的增益约为 1。为了提高灵敏度,像素可以集成一个电容跨阻放大器^[180-183]。在以前,某些 MOS 图像传感器会集成电容跨阻放大器作为列放大器^[67],先进的 CMOS 技术使得在像素中集成电容跨阻放大器成为可能^[181-183]。

在图 3.4 中,考虑光电二极管节点,总电流是 0,使下式成立:

$$I_{ph} + C_{PD} \frac{dV_{PD}}{dt} + C_{int} \frac{d(V_{PD} - V_{out})}{dt} = 0 \quad (3.13)$$

式中: I_{ph} 为 PD 的光电流。

根据式(3.13),输出电压可以表示为^[181]

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{I_{ph}}{C_{int} \left(1 - \left(1 + \frac{1}{A} \frac{C_{PD}}{C_{int}} \right) \right)}$$

所以

$$V_{out} = \frac{1}{C_{int}} \int I_{ph} dt, \quad A \gg \frac{C_{PD}}{C_{int}} > 1 \quad (3.14)$$

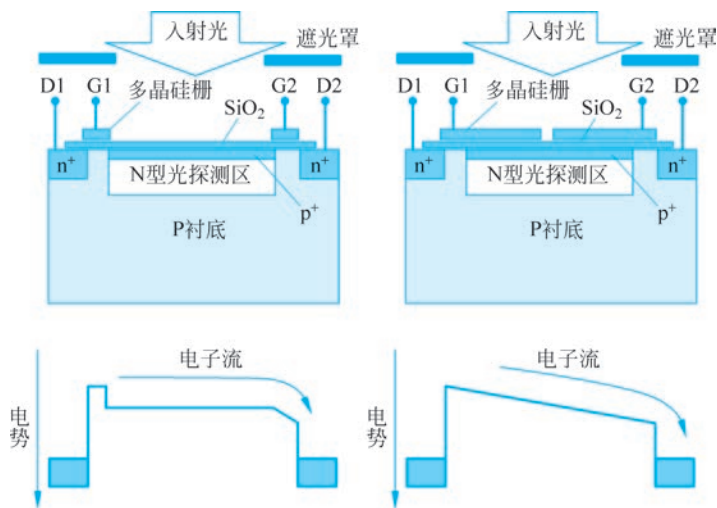
式中: A 是放大器的开环增益, $V_{out} = AV_{PD}$ 。

根据式(3.14),输出电压与 3T-APS 的光电二极管电容 C_{PD} 无关,反而受电容 C_{int} 控制。

3.2.1.4 锁定型像素

图像传感器中光电二极管的光生载流子通常通过扩散移动,这是因为光电二极管的平面内方向没有电场。在一个锁定型像素中,光电二极管的面内方向会引入一个电场,从而使光生载流子迅速漂移到电极。若在光电二极管中面对面放置好电极,则可以通过极间电压调制光生载流子。这种功能可用于锁定操作,其中光生载流子的信号可通过外部调制信号进行调制。典型的锁定像素的结构原理图如图 3.5 所示^[184]。

锁定像素通常用于解调器件和飞行时间图像传感器,这两种器件将在 4.5 节和 4.6 节介绍。现在已经出现了多种锁定型像素,如光子混合器(PMD)^[185]、电流辅助光子解调器(CAPD)^[186-187]、横向电场电荷调制器(LEFM)^[188]等。对它们来说在可接受的空间分辨率

图 3.5 锁定像素的结构原理图^[184]

(或像素数量)条件下实现锁定像素功能和高信噪比十分重要。

3.2.2 脉冲调制型像素

APS 经过一定时间才能读出输出信号,而在脉冲调制(PM)中,当信号达到了某一特定值时输出信号才会产生,这类使用脉冲调制的传感器称为脉冲调制传感器、饱和时间传感器^[189]或地址事件表示传感器^[56]。脉冲宽度调制(PWM)和脉冲频率调制(PFM)的基本结构如图 3.6 所示。其他脉冲方法,如脉冲振幅调制和脉冲相位调制很少用于 CMOS 智能传感器。

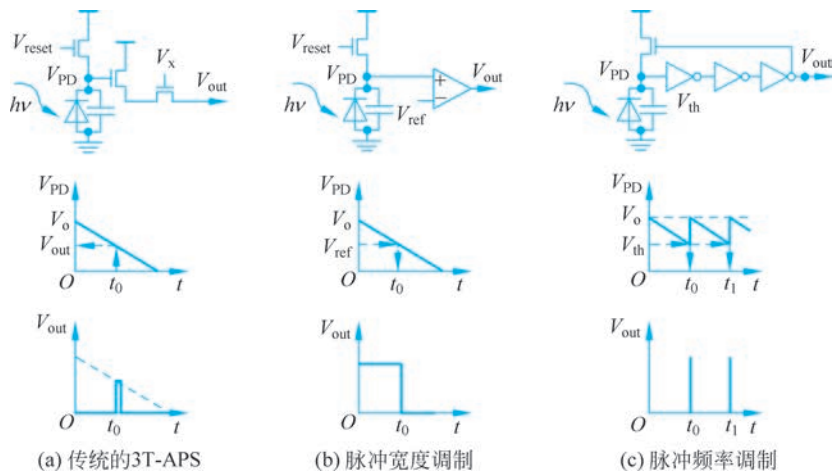


图 3.6 脉冲调制的基本电路结构

K. P. Frohmader 最早提出基于脉冲频率调制的图像传感器的概念^[190], K. Tanaka 等最先发表基于脉冲频率调制图像感知的应用^[108], 他使用砷化镓 MSM 光电探测器来演示传感器的基本工作情况, MSM 光探测器在 2.3.5 节讨论过。基于脉冲宽度调制的图像传感器由 R. Muller 首次提出^[191], V. Brajovic 和 T. Kanade 首次证明它在传感器中的

应用^[179]。

脉冲调制的特点:异步工作、数字输出、低电压工作。因为脉冲调制传感器中的每个像素都能独立地决定是否输出,所以脉冲传感器可在没有时钟(异步)的条件下工作。这个特点给基于脉冲调制的图像传感器提供了对环境光照的自适应特性,因此可以作为宽动态范围的图像传感器进行应用。

脉冲调制传感器的另一个重要特征是其可以用作模数转换器。在脉冲宽度调制中,脉冲宽度的计数值是数字值。图 3.6 是一个脉冲宽度调制的例子,其本质上相当于一个单斜模数转换器,而脉冲频率调制相当于一种 1 位的模数转换器。

因为脉冲调制传感器输出数字值,所以适合工作在低电压条件下。下面将介绍几种脉冲调制传感器。

3.2.2.1 脉冲宽度调制

R. Muller 首次提出并证实了基于脉冲宽度调制的图像传感器^[191],后来 V. Brajovic 和 T. Kanade 提出并证实一种使用脉冲宽度调制光电探测器的图像传感器^[192]。这种传感器通过增加电路来计算全局操作时处于导通状态的像素的数量总和,可以用强度直方图获得其累计变化。

这种数字输出方案适合片上信号处理。M. Nagata 等提出并证实使用脉冲宽度调制的时域处理方案,并声明脉冲宽度调制适用基于深亚微米技术的低电压和低功耗设计^[193],他们还展示了一种能够实现片上信号模块平均化和二维映射的脉冲宽度调制图像传感器^[194]。

文献[195-196]证明了脉冲宽度调制的低电压工作特性,其中基于脉冲宽度调制的图像传感器在低于 1 V 的电源电压下工作。特别地,S. Shishido 等^[196]验证了一种由三个晶体管加上一个光电二极管组成像素的脉冲宽度调制图像传感器,这种设计克服了传统脉冲宽度调制图像传感器中比较器需要很多晶体管的缺点。

脉冲宽度调制可以用来拓宽图像传感器的动态范围,这将在 4.4.3.3 节详细论述,目前已有很多这个课题的研究成果,文献[189]中讨论了使用脉冲宽度调制的几个优点,包括改善脉冲宽度调制的动态范围和信噪比。

脉冲宽度调制也可以在数字像素传感器(DPS)中用作像素级模数转换器^[64,197-198]。有些传感器为了尽量减少单位像素的面积而使用一个简单的反相器作为比较器,这样多个像素可以使用一个处理单元^[64]。W. Bidermann 等已经实现了片上的传统比较器和存储器^[198]。图 3.7(b)中,一个斜坡波形输入到比较器的参考端,这种电路几乎和单斜模数转换器相同,这种类型的脉冲宽度调制能够利用斜坡波形同步工作。

3.2.2.2 脉冲频率调制

当累积信号达到阈值时,脉冲宽度调制产生一个输出信号。同样在脉冲频率调制中,累积信号达到阈值时产生输出信号,累积电荷复位,累积过程会重新开始。重复这一过程,会持续产生输出信号,输出信号产生的频率与输入光照度成正比。人们在生物系统中发现了类似于编码系统的脉冲频率调制^[199],它激励脉冲信号进行处理过程^[200-201],在第 5 章将论述 K. Kagawa 等研究的脉冲式图像处理过程^[202]。T. Hammadou 已经论证了脉冲频率调制下的随机算法^[203]。K. P. Frohmader 等首先提出并验证了基于脉冲频率调制的感光传感器^[177],K. Tanaka 等^[106]首先提出了基于脉冲频率调制的图像传感器,W. Yang^[204]成

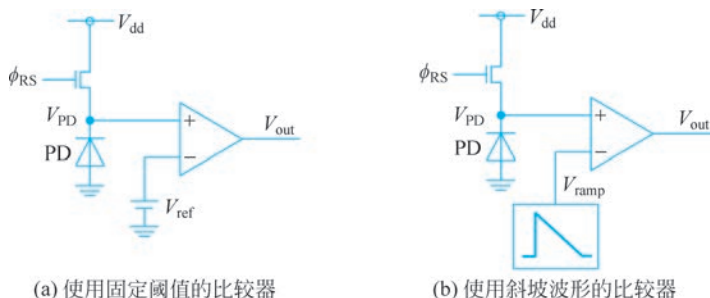


图 3.7 基于脉冲宽度调制的光电传感器的基本电路结构

功验证了具有宽动态范围的基于脉冲频率调制的图像传感器(详见文献[156,205-206])。

脉冲频率调制的一项应用是地址事件表达(AER)^[207],例如它可以用于传感器网络摄像机系统^[208-209]。

脉冲频率调制光传感器可以用于生物医学领域,例如极微光下的生物技术探测^[210-211],这将在4.2.1.1节进行介绍。脉冲频率调制另一项在生物医学领域的应用是视觉假体,文献[212]首次提出在视网膜下植入脉冲频率调制光传感器的视觉假体,之后原课题组^[202,205,213-223]和其他一些课题组^[224-227]不断地继续深入研究。5.5.2节将对视觉假体进行介绍。

1. 脉冲频率调制的工作原理

图3.8显示了脉冲频率调制光传感器单元的基本电路。在电路中, C_{PD} 被充电到 V_{dd} ,包括暗电流 I_d 在内的总光电流 I_{ph} 使光电二极管电容 C_{PD} 放电,结果引起 V_{PD} 减小。当 V_{PD} 达到反相器的阈值电压 V_{th} 时,反相器链开始导通,产生输出脉冲。输出频率可以大致表达为

$$f \approx \frac{I_{ph}}{C_{PD}(V_{dd} - V_{th})} \quad (3.15)$$

图3.9是图3.8所示脉冲频率调制光传感器的实验结果,输出频率与输入光照度成正比,测量得到的动态范围接近100dB,在低光照度区域,频率由于暗电流的影响而达到饱和。

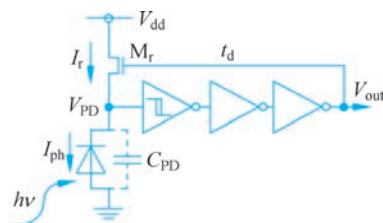


图 3.8 脉冲频率调制光传感器单元的基本电路

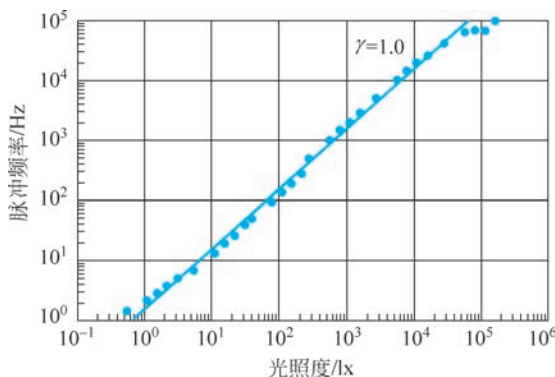


图 3.9 图 3.8 所示脉冲频率调制光传感器的实验中输出脉冲频率与输入光照度的关系

包含施密特触发器的反相器链有一个延时 t_d ，由复位晶体管 M_r 提供的复位电流 I_r 是一个有限值。以下是考虑这些参数在内的一组分析（更细致的分析参见文献[217]）：光电二极管通过光电流 I_{ph} 放电，因为光电流在电容充电过程中仍会产生，所以光电二极管由复位电流 I_r 减去 I_{ph} 的电流充电。

考虑 t_d 和 I_r , V_{PD} 的变化如图 3.10 所示, V_{PD} 的最大电压和最小电压可以表示为

$$V_{\max} = V_{thH} + \frac{t_d(I_r - I_{ph})}{C_{PD}} \quad (3.16)$$

$$V_{\min} = V_{thL} - \frac{t_d I_{ph}}{C_{PD}} \quad (3.17)$$

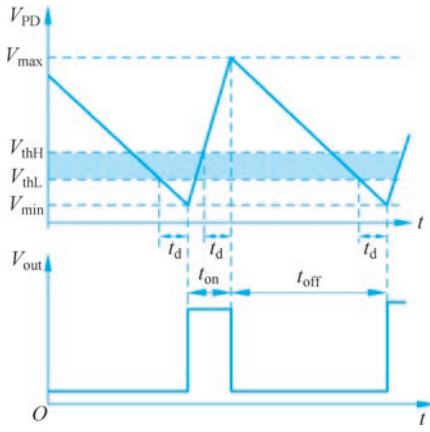


图 3.10 考虑延时 t_d 时, V_{PD} 随时间的变化

式中: V_{thH} 和 V_{thL} 为施密特触发器的高阈值电压和低阈值电压; I_{ph} 为放电电流; $I_r - I_{ph}$ 为充电电流或复位电流。

图 3.10 给出的 t_{on} 和 t_{off} 的值为

$$t_{on} = \frac{C_{PD}(V_{thH} - V_{\min})}{I_r - I_{ph}} + t_d = \frac{C_{PD}V_{th} + t_d I_r}{I_r - I_{ph}} \quad (3.18)$$

$$t_{off} = \frac{C_{PD}(V_{\max} - V_{thL})}{I_{ph}} + t_d = \frac{C_{PD}V_{th} + t_d I_r}{I_{ph}} \quad (3.19)$$

式中: $V_{th} = V_{thH} - V_{thL}$; t_{on} 为复位晶体管 M_r 给光电二极管充电的时间, 即 M_r 开启的时间,

在这段时间内, 脉冲处于导通状态, 因此它等于脉冲宽度; t_{off} 为 M_r 断开的的时间, 在这段时间内, 脉冲处于关断状态。

脉冲频率调制光传感器的脉冲频率可表示为

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \\ &= \frac{I_{ph}(I_r - I_{ph})}{I_r(C_{PD}V_{th} + t_d I_r)} \\ &= \frac{I_r^2/4 - (I_{ph} - I_r/2)^2}{I_r(C_{PD}V_{th} + t_d I_r)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

若 M_r 的复位电流 I_r 比光电流 I_{ph} 大得多, 则式(3.20)就变成

$$f \approx \frac{I_{ph}}{C_{PD}V_{th} + t_d I_r} \quad (3.21)$$

从而脉冲频率 f 就与光电流 I_{ph} 成正比, 也就是和输入光照度成正比。

另外, 由式(3.20)可以看出, 频率 f 在光电流到 $I_r/2$ 时达到最大值, 然后开始下降, 其最大频率为

$$f_{\max} = \frac{I_r}{4(C_{PD} + t_d I_r)} \quad (3.22)$$

脉冲宽度为

$$\tau = t_{\text{on}} = \frac{C_{\text{PD}} V_{\text{th}} + t_{\text{d}} I_{\text{r}}}{I_{\text{r}} - I_{\text{ph}}} \quad (3.23)$$

图 3.11 显示了脉冲频率和脉冲宽度取决于输入光照度,它们之间的关系式见式(3.22)和式(3.23)。

2. 自动复位操作

在强光条件下,由于光电二极管的饱和,很难检测到弱光。为了解决这个问题,已经有研究人员开发出了一种自复位型 CMOS 图像传感器^[228-229]。

自复位型 CMOS 图像传感器的原理几乎与脉冲频率调制图像传感器相同(图 3.12)。当光线非常强时,由于有限的阱容量/存储电荷,信号会增加并最终饱和,因此,无法测量超过此强度级别的信号,散粒噪声也会增加。对于自复位型图像传感器,若光线导致阱饱和,则将使用类似于脉冲频率调制的反馈路径自动进行光电二极管的复位。

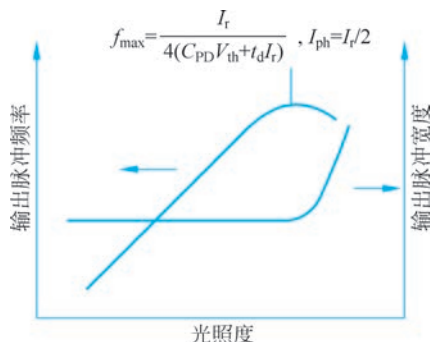


图 3.11 脉冲频率和脉冲宽度取决于输入光照度

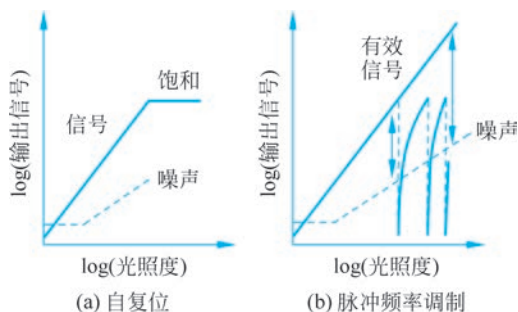


图 3.12 自复位型图像传感器与脉冲频率调制图像传感器原理对比

自复位型图像传感器的实现如图 3.13 所示^[229]。每个像素的晶体管数量仅为 11,这是因为复位计数电路不能在一个像素中实现。表 3.2 列出了与以前报道的脉冲频率调制传感器的规格比较结果。

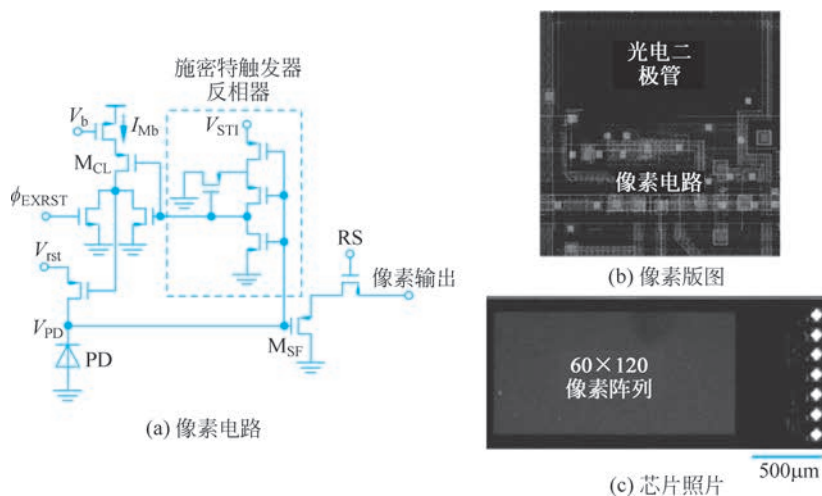


图 3.13 自复位型 CMOS 图像传感器^[229]

表 3.2 基于脉冲频率调制图像传感器的比较

参 考 文 献	[230]	[231]	[232]	[233]	[229]
技术	0.25 μm	0.35 μm	0.18 μm	0.50 μm	0.35 μm
晶体管数量/像素	未知	未知	43	28	11
像素大小/($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	45 $\times$ 45	25 $\times$ 25	19 $\times$ 19	49 $\times$ 49	15 $\times$ 15
自复位类型	COMP	COMP	COMP	ST	ST
计数器/bit	8	1	6	6	—
填充因子/%	23	27	50	25	26
电路面积/($\times 10^2\mu\text{m}^2$)	16	4.6	18	18	1.7
最高帧率/kHz	1	0.015	1	>1	0.3
峰值信噪比/dB	未知	74.5	55.6	65	64

注：COMP—比较器；ST—施密特触发器。

在脉冲频率调制图像传感器中复位值对于构建图像至关重要，而在自复位类型的图像传感器中最终复位操作后的输出数据将用于图像。图 3.14 清楚地表明，通过使用自复位模式，信噪比可以提高 10dB 以上。自复位型图像传感器测量大鼠大脑中神经信号的应用将在 5.4.3.1 节介绍。

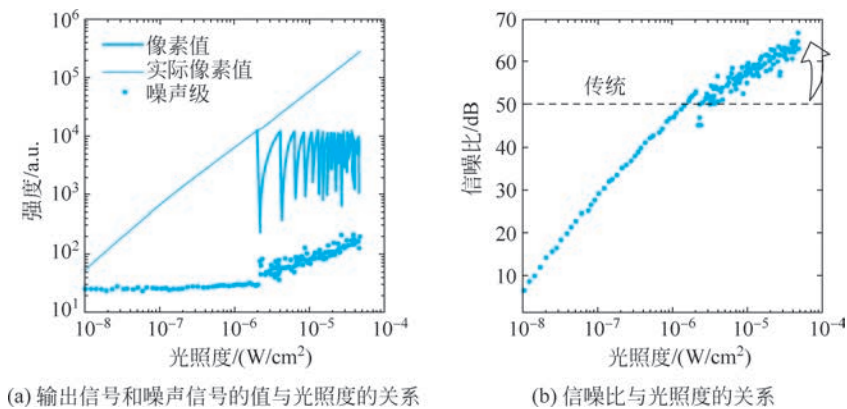


图 3.14 自复位型 CMOS 图像传感器的实验结果^[229]

3.2.2.3 单光子雪崩二极管 (SPAD)

如第 2 章所述，单光子雪崩二极管是工作在盖革模式下的雪崩光电二极管，并输出一个脉冲序列，本节将具体介绍单光子雪崩二极管。图 3.15(a)显示了标准 CMOS 技术中雪崩光电二极管的像素结构。雪崩光电二极管在深 n 阱中制造，其中多个区域被 p⁺ 保护环包围。在盖革模式下，雪崩光电二极管会产生类似尖峰的信号，而不是模拟类型的输出，输出模拟信号的是单光子雪崩二极管。如图 3.15 所示，带有反相器的脉冲整形器被用于将信号转换为数字脉冲。单光子雪崩二极管有两种模式：光子计数模式和光子计时模式^[234]。在光子计数模式下，它主要用于测量微秒级别的变化缓慢且非常微弱的光信号的强度；在光子计时模式下，它用于在皮秒内重建非常快的光学波形^[234]。在光子计数模式中，在一定的时间段内对输出脉冲的数量进行计数，以获得光强随时间的变化。在光子计时模式下，时间数字计数器(TDC)可以集成在单光子雪崩二极管像素中或芯片上。在这两种模式下，都需

要取平均运算操作。

最近,有研究人员成功研究出了 512×512 像素的单光子雪崩二极管图像传感器^[235]。其中一个像素里有 11 个晶体管和 1 个雪崩光电二极管。该传感器由一个单光子雪崩二极管、一个 1 位存储器和一个能够使单光子雪崩二极管导通、关断的门控机制组成。

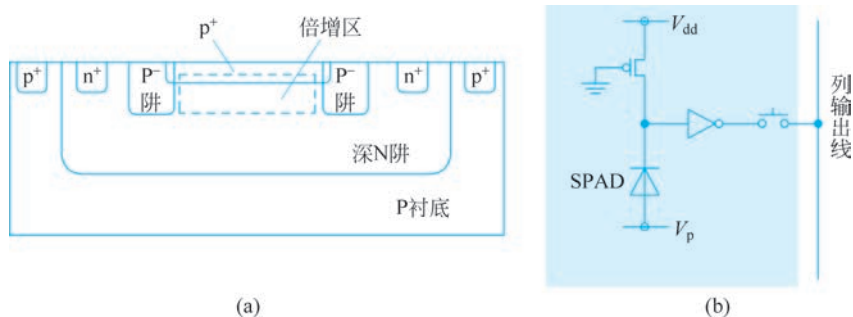


图 3.15 标准 CMOS 技术中的雪崩光电二极管和像素中盖革模式雪崩光电二极管的 CMOS 电路的基本结构^[93]

注: 连接到 V_{dd} 的 PMOS 用作淬灭过程的电阻。 V_p 是一个负电压值, 迫使光电二极管进入雪崩击穿区域。

SPAD 为单光子雪崩二极管。

3.2.3 数字型像素

如图 3.16 所示^[63-64], 智能 CMOS 图像传感器中的数字处理架构是基于在每个像素中采用一个模数转换器(在某些情况下, 模数转换器以列并行方式放置^[236]), 称为视觉处理芯片, 其中处理过程在芯片上完成。具有数字输出的 CMOS 图像传感器通常称为数字像素传感器^[197-198]。由于是数字信号输出, 数字像素传感器的响应速度很快。另外, 芯片可以进行编程操作。

图 3.16 展示了数字像素传感器的基本电路, 由一个光电探测器、一个缓冲器和一个模数转换器组成。由于模数转换器通常是占用面积严重的电路, 因此在像素中实现小面积模数转换器十分关键。

如上所述, 数字处理架构的关键特征是在像素内实现模数转换器。面积效率是像素内模数转换器的最重要因素之一。根据表 2.3 的比较结果, 单斜模数转换器(参见 2.6.3 节)是像素内模数转换器的备选。图 3.17 显示了在像素中采用的单斜模数转换器^[197], 它具有 8 位存储器。

数字像素传感器在智能 CMOS 图像传感器中非常有竞争力, 因为它们可以精确地编程。此外, 数字像素传感器已实现 10^4 帧/s 的高速度^[197]和超过 100dB 的宽动态范围^[198]。因此, 它适用于机器人视觉领域, 该领域需要一定的通用性, 以及可以实现快速响应的自主操作。

与表 2.3 相比, 有更加简单的模数转换器, 在像素中使用模数转换器可以实现具有快速处理速度的编程操作。文献[63]介绍了一种简单的脉冲宽度调制方案, 使用了一个反相器

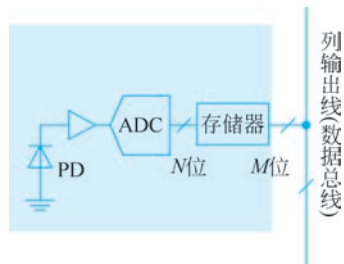


图 3.16 数字像素传感器的基本像素电路

3.3 智能材料和结构

本节将介绍可用于智能 CMOS 图像传感器的除单晶硅以外的几种材料。硅可以吸收可见光,硅对于可见光波长区域是不透明的。而有一些材料在可见光波长区域是透明的,这在现代 CMOS 工艺中绝缘体上硅和蓝宝石上硅都有用到,如 SiO_2 和 Al_2O_3 。硅的可检测波长取决于它的能带间宽度,约为 $1.1\mu\text{m}$ 的波长。与硅相比,其他材料如 SiGe 和 Ge 能够响应波长更长的光,锗的基本特性见附录 A。

3.3.1 绝缘体上硅

近年来,绝缘体上硅 CMOS 工艺已经应用于低电压电路^[238]。这种 SOI 的结构如图 3.19 所示,一层薄硅层置于一层氧化物掩埋层(BOX)上,顶层硅位于 SiO_2 层或绝缘层上。传统的 CMOS 晶体管可称作体 MOS 晶体管,这样可以明显地区别于 SOI MOS 晶体管。MOS 晶体管制作在一层 SOI 上,并通过深入到 BOX 层的浅沟槽隔离工艺实现完全隔离,如图 3.19(b)所示。相比于体 CMOS 晶体管,这种晶体管具有能耗低、门锁效应较小和寄生电容小等优点^[238]。

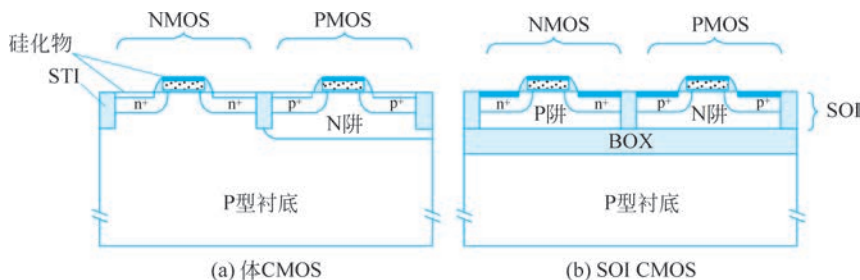


图 3.19 体 CMOS 的横截面和 SOI CMOS 的横截面

注: STI—浅沟槽隔离; SOI—绝缘体上硅; BOX—掩埋氧化层,硅化物是由硅和金属(如 TiSi_2)制成的合成材料。

SOI 工艺适用于 CMOS 图像传感器的原因如下:

(1) 利用 SOI 工艺制成的电路电压低、功耗小^[239],这种特性对于移动设备、传感器网络、可植入医疗设备来说非常重要。

(2) 体 CMOS 晶体管工艺中的 N 阱层对于建立在 P 型衬底上的 PMOS 是必不可少的,而当使用 SOI 工艺时,使用 NMOS 和 PMOS 晶体管不会牺牲多余面积。图 3.19 清晰地给出了体工艺和 SOI 工艺的 CMOS 对比。PMOSFET 复位晶体管与 NMOSFET 复位晶体管相比,其由于没有压降更适用于 APS 中。

(3) SOI 技术使制造背照式图像传感器变得更加容易,这将在 3.3.3 节介绍。

(4) SOI 结构有利于减少像素之间扩散载流子而引起的串扰,衬底产生的光生载流子可以到达 SOI 图像传感器的像素当中。SOI 技术中每个像素都是电学隔离的。

(5) SOI 工艺也可以用于三维集成^[240-241],文献[240]论述了在图像传感器中使用 SOI 技术实现三维集成这种具有先驱意义的研究。通过引入镶嵌金的电极,直接连接方法可以实现像素级的电互连^[242]。图像传感器的 3D 集成将在 3.3.4 节进行介绍。

SOI 层通常很薄(一般小于 200nm),因此光灵敏度很低。为了实现良好的光灵敏度,

人们提出了几种解决方法。与传统 APS 最兼容的方法是在衬底上制作一个光电二极管区域^[243],这就保证了其光灵敏度与传统光电二极管的光灵敏度相同,但是这需要改变标准 SOI 工艺的制造方法;此外,表面后处理的工艺对于获得低的暗电流也很重要。另一种方法是使用一个横向光电晶体管,在图 2.6(d)有介绍^[244]。因为横向光电晶体管有增益,所以即使在很薄的光检测层,光灵敏度也会增加。SOI 的另一种应用是横向 PIN 光电二极管^[245],尽管在这种情况下需要权衡考虑光探测区域和像素密度。3.2.2.2 节介绍的脉冲频率调制光电传感器若使用 SOS 工艺将非常有效,本章还将进一步讨论。

通过有选择性地使用 SiO_2 刻蚀剂刻蚀 BOX 层可以轻松制造一个束状的硅结构,所以 SOI 被广泛应用于微机电系统(MEMS)。这种结构在图像传感器领域的一个应用是非制冷红外焦平面阵列(FPA)图像传感器^[247]。采用一个热绝缘的 PN 结二极管完成红外检测;热辐射使 PN 结内建电势差发生变化,通过感知这一变化可以测量温度,从而可以检测红外辐射。结合微机电系统的结构,拓宽了 SOI 在图像传感器领域的潜在应用范围。

最近,基于 SOI 工艺的 CMOS 图像传感器被开发并应用于检测高能粒子^[246,248]。图 3.20 展示了基于 SOI 结构的高能粒子检测器的剖面原理图^[246]。入射的高能粒子在厚的高阻衬底内部产生电子-空穴对。图中,BOX 层下的 PN 结中检测到产生的空穴。为了检测信号,该 PN 结二极管被连接到 SOI 电路上。

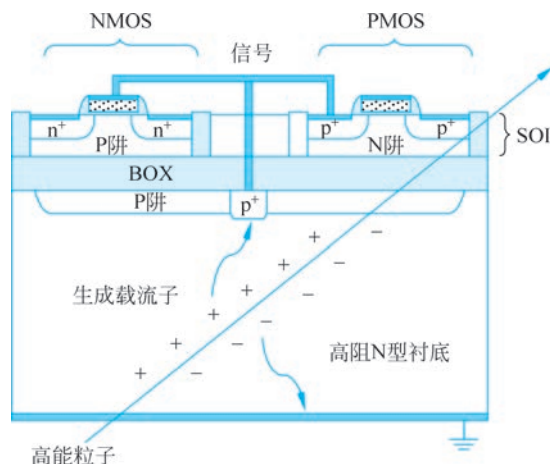


图 3.20 SOI 工艺的高能粒子检测器横截面^[246]

注：它由厚的高阻 N 型衬底,以及 BOX 和 SOI 组成,PN 结在衬底内部形成,并且 p 极通过从衬底到 SOI 的 BOX 层的通孔连接到 SOI 电路上。

蓝宝石上硅

蓝宝石上硅是使用蓝宝石代替硅作为衬底的一种技术^[249-250],它直接在蓝宝石衬底上生长一层薄硅层。注意,顶层硅不是多晶硅、非晶硅而是单晶硅,因此它的流动性等物理属性几乎和一个普通的 Si-MOSFET 相同。蓝宝石是氧化铝,它对于可见波长区域是透明的,所以使用 SOS 技术的图像传感器无须任何打薄处理就可以用作背照式图像传感器^[214,245,251-252],但是为了获得平整的背面,还是需要一些打磨。文献[245]提到了横向光电晶体管,文献[214,251]提到了脉冲频率调制光电传感器,其在薄的探测层中光灵敏度较低。图 3.21 是一个用 SOS CMOS 技术制成的图像传感器,这个芯片被放在一叠打印出来

的纸上,可以透过透明的衬底清楚看到纸上的打印图案。

3.3.2 扩展到近红外区

硅的灵敏度通常高达 $1.1\mu\text{m}$,这是由硅的能带隙 $E_g(\text{Si})=1.12\text{eV}$ 决定的。即使光波长小于 $1.1\mu\text{m}$,使用基于硅的光电二极管探测近红外光通常也很困难。在本节中,为了增强近红外光区域的探测性能,提到了两种方法。在这里,近红外光被定义为波长为 $0.75\sim 1.4\mu\text{m}$ 的光(参见附录 D)。第一种方法是引入多路径使近红外光进入硅内部。即使在近红外光区域吸收系数很小,这种多路径也延长了光子的传播距离。第二种方法是引入硅以外的材料。

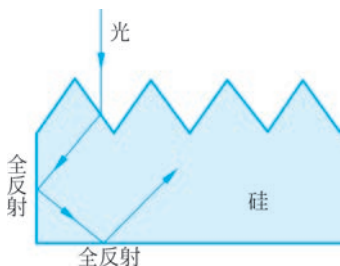


图 3.22 微小的倒金字塔结构可以实现多路径入射,可以拓展接近硅带隙波长附近的可检测 NIR 区域^[253]

3.3.2.1 多路径结构

通过在硅表面引入许多微小的倒金字塔结构,可以扩展如图 3.22 所示的入射光路^[253]。由于入射光能够以这种多路径结构传播很长的距离,因此即使在近红外光区域中的吸收很小,近红外光的吸收总量也会增加,从而可检测性得到提升。在文献[253]中,与具有平滑表面的传感器相比,使用多路径结构在 850nm 波段处的灵敏度提高了 80% 。

延长光传播路径的另一种方法是引入黑硅^[254],黑硅是一种纳米结构材料,在可见光到近红外范围内几乎没有任何反应发生,为黑色。黑硅的制造过程与常规 CMOS 图像传感器的制造过程兼容。与倒金字塔结构相比,黑硅的优势在于其易于制造,然而其缺点是对具有小尺寸像素的图像传感器光灵敏度可能不均匀。

3.3.2.2 非硅材料

为了扩展灵敏度到 $1.1\mu\text{m}$ 以上,需要使用除传统的 Si 以外的其他材料,有许多材料的灵敏度在比硅更长的波长范围内。为了实现灵敏度的适用波长范围更长的智能 CMOS 图像传感器,需要在更长波长范围有良好光灵敏度的混合集成材料,如 SiGe、Ge、InGaAs、InSb、HgCdTe、PbS 和量子阱红外线光电探测器(QWIP)^[255] 以及一些其他被推荐的材料^[256]。这些材料具有的光灵敏度的波长被称为短波红外(SWIR)($1.4\sim 3\mu\text{m}$,见附录 D)。除了黑硅和 SiGe,这些材料都可以被放置在硅读出集成电路(ROIC)上,该电路与一个同金属凸块键合的倒装芯片相连。几种使用 ROIC 来实现短波红外检测的方法见文献[257]。例如,已经开发了在 ROIC 上放置 PbS 量子点膜的短波红外图像传感器^[258]。

在超过 $3\mu\text{m}$ 的区域或中波红外(MWIR)($3\sim 8\mu\text{m}$,见附录 D)区,肖特基势垒光电探测器如硅化铂(PtSi)已广泛用于红外图像传感器中^[259],可以单片集成在硅衬底上。这些中波红外图像传感器通常在低温条件下工作,但是最近已经开发了非冷却型 MWIR/LWIR 图像传感器。带有这种配置的 MWIR/LWIR 图像传感器已有许多报道,本书不作具体介绍。

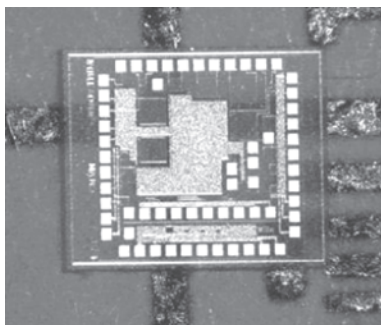


图 3.21 应用 SOS 技术制成的脉冲频率调制光电传感器

在介绍相应的传感器之前,简要概括硅-锗和锗材料。 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 是硅和锗以任意比例 x 混合的一种混合晶体^[260]。它的能带间隙可以从 $\text{Si}(x=1), E_g(\text{Si})=1.12\text{eV}, \lambda_g(\text{Si})=1.1\mu\text{m}$ 到锗($x=0$), $E_g(\text{Ge})=0.66\text{eV}, \lambda_g(\text{Ge})=1.88\mu\text{m}$ 变化。硅上的硅-锗可以用于高速电路的异质结双极晶体管或者应变 MOSFET。硅和锗的晶格常数之间的晶格失配很大,导致很难在硅衬底上生长厚的硅-锗外延层。最近,硅上锗技术已经在光纤通信中的高速接收器方面取得了很大发展,其适用于 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ 波长区域的光^[261]。通过各种方法可以减轻硅和锗之间大的晶格失配,从而获得高质量的硅上外延锗层^[261]。通过使用为高速光通信开发的这些技术,已经有研究人员开发出了具有锗检测层的图像传感器^[262-263]。用于 NIR-SWIR 的另一种材料是 InGaAs。

现在介绍一种在可见光区域和近红外区域以及眼睛安全波长区域都有较好灵敏度的智能 CMOS 图像传感器^[264-265]。人眼对眼睛安全波长区域($1.4\sim 2.0\mu\text{m}$)的容忍性要比可见区域更大,这是因为与可见区域相比,角膜吸收的眼睛安全区域的光要多于可见区域,因此对视网膜的伤害较小。

这种传感器包含一个传统 Si-CMOS 图像传感器和一个位于 CMOS 图像传感器下面的锗光电二极管阵列,这种传感器捕获可见图像的能力并不会由于其范围扩大到红外区域而受影响。近红外探测依靠从锗光电二极管注入硅衬底的光生载流子,如图 3.23 所示。

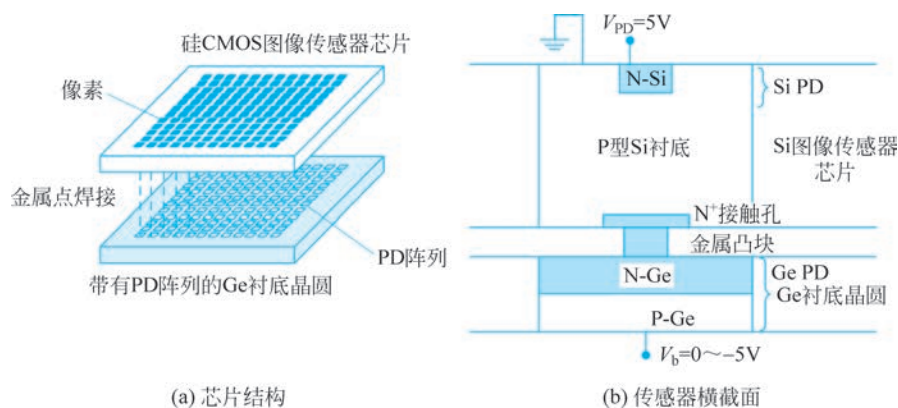


图 3.23 可以在可见光区域和人眼安全区域都能检测的智能 CMOS 传感器^[242] (经许可修改自文献^[264])

在锗光电二极管区域产生的光生载流子注入 Si 衬底中,然后通过扩散到达 CMOS 图像传感器像素中的光转化区域。如图 3.24 所示,当施加偏压时,近红外光区域的响应率增加,图中展示了光敏反应实验的测试装置。注意,因为在近红外光波长区域 Si 衬底是透明的,所以近红外光可以被位于传感器背面的锗光电二极管检测到。

3.3.3 背照式 CMOS 图像传感器

如图 3.25 所示,背照式 CMOS 图像传感器与传统 CMOS 图像传感器或前照式(FSI) CMOS 图像传感器相比,其具有较大的填充因子和较大的光学响应角等优点^[266-270]。图 3.25(a)显示了常规 CMOS 图像传感器或前照式 CMOS 图像传感器的横截面,其中输入光从微透镜到光电二极管传播了很长的距离,从而导致像素之间发生串扰,另外,金属线对光形成了阻碍。在背照式 CMOS 图像传感器中,微透镜和光电二极管之间的距离减小,从

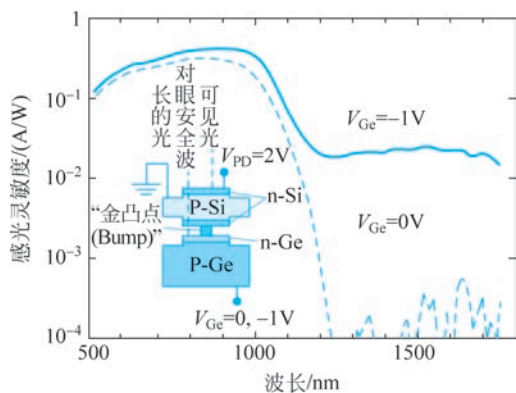


图 3.24 随输入光波长变化的光灵敏度变化曲线(经许可修改自文献[264])

注：锗光电二极管的偏压 V_G 是一个参量,图中展示了光敏反应实验的测试结构。

而光学特性得到了显著提升。由于光电二极管上的 P 型硅层必须很薄才能最大程度地减少该层中的吸收,因此通常将衬底打磨成薄层。注意,该结构类似于电荷耦合式器件的结构,其中在光电二极管和金属层之间存在非常薄的 SiO_2 层使光学串扰最小化。

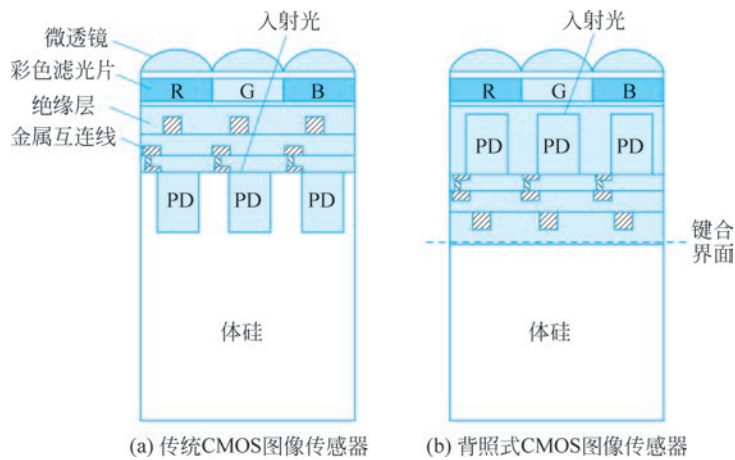


图 3.25 传统 CMOS 图像传感器的横截面和背照式 CMOS 图像传感器的横截面

3.3.4 三维集成

三维(3D)集成可以在有限区域集成更多的电路。具有三维集成结构的图像传感器在其顶层具有成像区,并在后续层中具有信号处理电路。因此,三维集成技术可轻松实现像素级的处理或像素并行处理。

近年来,基于背照式 CMOS 图像传感器的结构,已经有研究人员开发出了三维集成或堆叠的 CMOS 图像传感器。图 3.26 显示了堆叠图像传感器芯片及其横截面结构的概念图。图中的三维图像传感器是在制造背照式 CMOS 图像传感器晶片之后制造的,该晶片与另一个带有处理电路的基于 SOI 的晶片连接。

实现三维集成有两种方法：一种是使用硅通孔(TSV)；另一种是使用微凸点,通过凸点直接键合两个晶片。在硅通孔技术中,将两个晶片键合后,形成了两个晶片之间的电学连

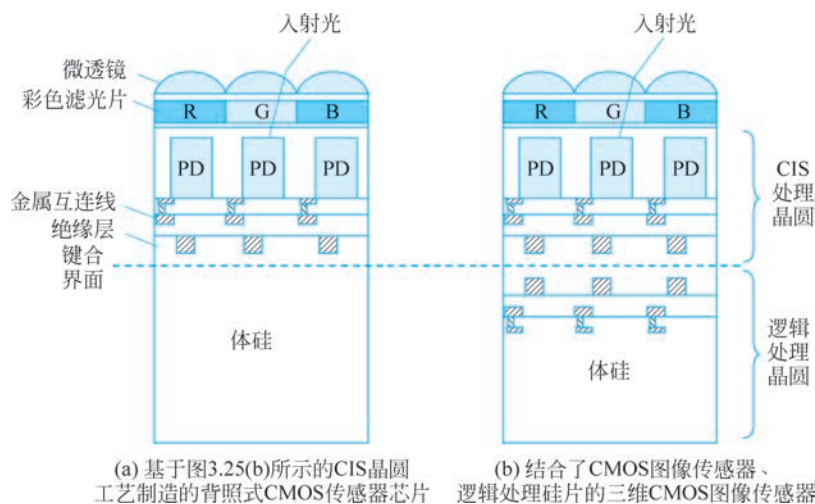


图 3.26 三维图像传感器芯片

接。如图 3.27(a) 所示,通常硅通孔形成在芯片^[271,272]的外围。微凸点方法可以实现图 3.27(b)所示的像素级互连或像素块互连^[273-275]。使用硅通孔方法,可以堆叠三个不同的处理晶片,即背照式 CMOS 图像传感器、DRAM 和逻辑处理晶片^[271,272]。扫描电子显微镜(SEM)的截面图如图 3.28 所示。

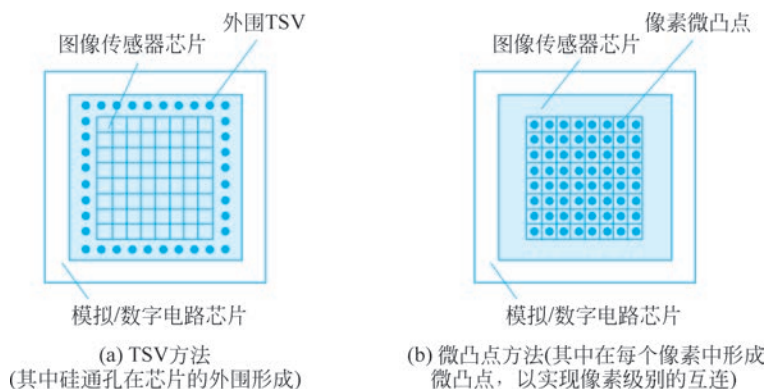


图 3.27 两种实现三维图像传感器芯片的方法

3.3.5 用于颜色识别的智能结构

通常,图像传感器可以检测颜色信号,并将光分解成基本的颜色信号,如使用片上彩色滤光片的 RGB。传统的颜色识别的方法已在 2.8 节进行介绍,其他使用智能功能实现颜色识别的方法将在后面介绍。

3.3.5.1 堆叠的有机 PC 薄膜

首先介绍一种可以获得 RGB 颜色的方法,即在一个像素上使用三个堆叠的光电导(PC)有机薄膜^[102-104,276],如图 3.29(a)所示,每个有机薄膜都相当于一个 PC 检测器(见 2.3.5 节),根据其感光度产生相应的光电流,这种方法几乎可以实现 100% 的填充因子。现在面临的主要问题是连接堆叠层。

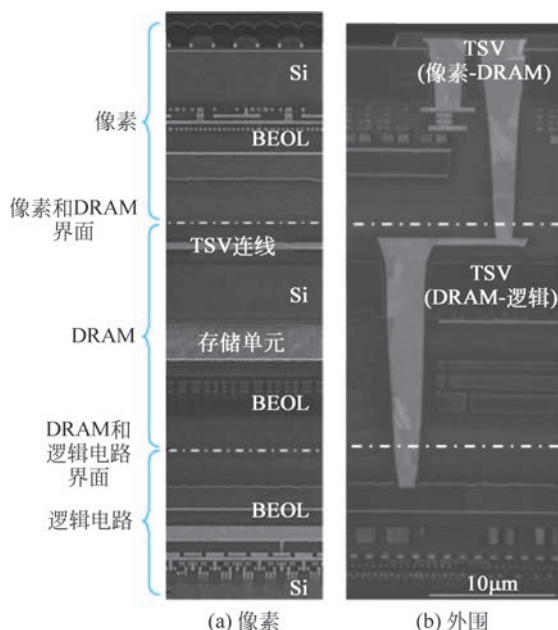


图 3.28 具有 3 个堆叠晶片的 CMOS 图像传感器的 SEM 截面图(经许可修改自文献[272])

注: 在该芯片中, 顶部、中间和底部分别由背照式 CMOS 图像传感器处理晶片、DRAM 处理晶片和逻辑处理晶片组成

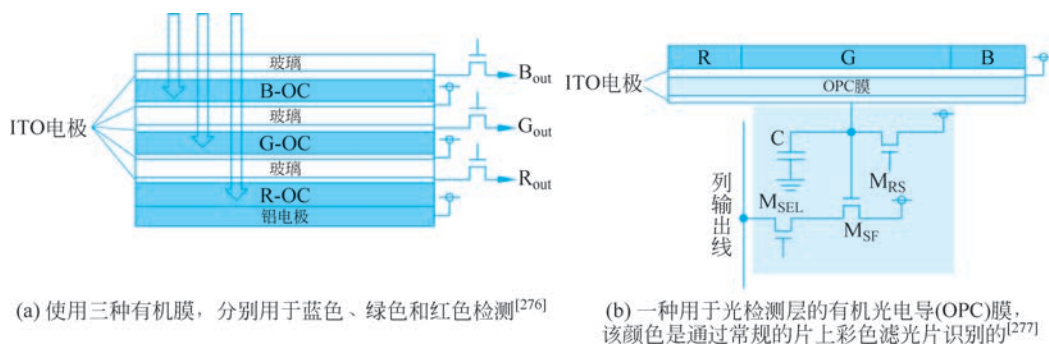


图 3.29 有机图像传感器的器件结构

另一种有机图像传感器用有机膜代替 Si 进行光检测, 并形成常规的片上 RGB 彩色滤光片^[277-278]。注意, 有机光电导薄膜的吸收系数比 Si 大了一个数量级。因此, 有机光电导膜的厚度可以比传统 CMOS 图像传感器中的光电二极管的膜要薄。这种方法也几乎可以实现 100% 的填充因子。在图 3.29(b) 中, 可以通过源极跟随器晶体管 M_{SF} 感知光电导电压, 复位转换和选择晶体管分别是 M_{RS} 和 M_{SEL} , 并加入电容器以提升像素的饱和度^[277]。

3.3.5.2 多重结

硅的光敏度取决于 PN 结的结深。因此, 位于一条垂直线的两个或三个结可以改变光敏范围^[279-281]。通过调整三个结深, 相对应的 RGB 颜色的最大光敏度就可以实现。图 3.30 展示了这种传感器的结构, 做一个三重阱来形成三个不同的二极管^[280-281], 这种传感器作为有源像素类型已经实现了商业化。

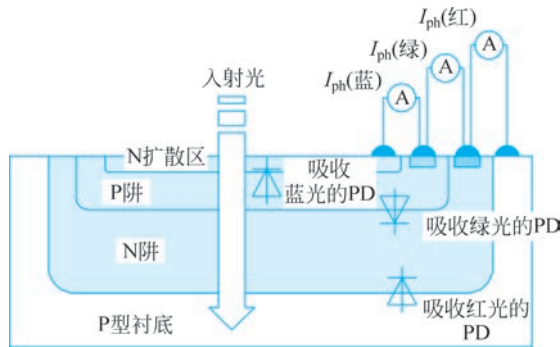


图 3.30 具有三结的图像传感器结构^[281]（这种商业化的传感器使用了有源像素结构）

3.3.5.3 控制电势分布

许多研究人员已经提出并证明了通过控制电势分布可以改变光子灵敏度^[282-284]范围，提出的这种系统主要使用由多层 P-I-I-N^[283] 和 N-I-P-I-N^[284] 构成的薄膜晶体管（TFT）层。Y. Maruyama 等提出了使用这种方法的智能 CMOS 图像传感器^[285-286]，虽然他们的目的不是颜色识别，而是无滤波荧光检测，这将在 3.4.6.2 节讨论。

电势控制原理^[285-286]：PN 结光电二极管的灵敏度通常由式 (2.19) 表示，这里使用如图 3.31 所示的电势分布，该图是由图 2.10 变化来的，即通过用 N 型衬底上的 PMOS 型栅极感光传感器代替 NMOS 型栅极感光传感器，给出两个耗尽区，一个源于感光传感器，另一个源于 PN 结。这个 PN 结产生一个凸电位，就像一个光生载流子的分水岭。

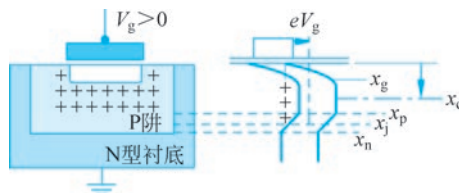


图 3.31 无滤光片的荧光图像传感器的器件结构和电势分布

此例中，式 (2.18) 的积分区域从 0 变化到 x_c ，因为在这个变化范围内光生载流子到达表面和衬底的概率是相同的，移动到衬底的光生载流子只引起光电流，所以灵敏度就变成

$$\begin{aligned}
 R_{ph} &= \eta_Q \frac{e\lambda}{hc} \\
 &= \frac{e\lambda}{hc} \frac{\int_0^{x_c} \alpha(\lambda) P_o \exp[-\alpha(\lambda)x] dx}{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) P_o \exp[-\alpha(\lambda)x] dx} \\
 &= \frac{e\lambda}{hc} (1 - \exp[-\alpha(\lambda)x_c])
 \end{aligned} \quad (3.24)$$

若有两束不同波长的光，激发光源 λ_{ex} 和荧光 λ_{fl} 同时入射，则总的光电流为

$$I_{ph} = P_o(\lambda_{ex}) A \frac{e\lambda_{ex}}{hc} (1 - \exp[-\alpha(\lambda_{ex})x_c]) + P_o(\lambda_{fl}) A \frac{e\lambda_{fl}}{hc} (1 - \exp[-\alpha(\lambda_{fl})x_c]) \quad (3.25)$$

式中: $P_o(\lambda)$ 和 A 分别是 λ 的入射光功率密度和 PG 面积。

当有两种不同栅压计算光电流时, x_c 有两个不同的值 x_{c1} 和 x_{c2} , 这就导致有两个不同光电流 I_{ph1} 和 I_{ph2} , 分别为

$$I_{ph1} = P_o(\lambda_{ex})A \frac{e\lambda_{ex}}{hc}(1 - \exp[-\alpha(\lambda_{ex})x_{c1}]) + P_o(\lambda_{fl})A \frac{e\lambda_{fl}}{hc}(1 - \exp[-\alpha(\lambda_{fl})x_{c1}])$$

$$I_{ph2} = P_o(\lambda_{ex})A \frac{e\lambda_{ex}}{hc}(1 - \exp[-\alpha(\lambda_{ex})x_{c2}]) + P_o(\lambda_{fl})A \frac{e\lambda_{fl}}{hc}(1 - \exp[-\alpha(\lambda_{fl})x_{c2}])$$
(3.26)

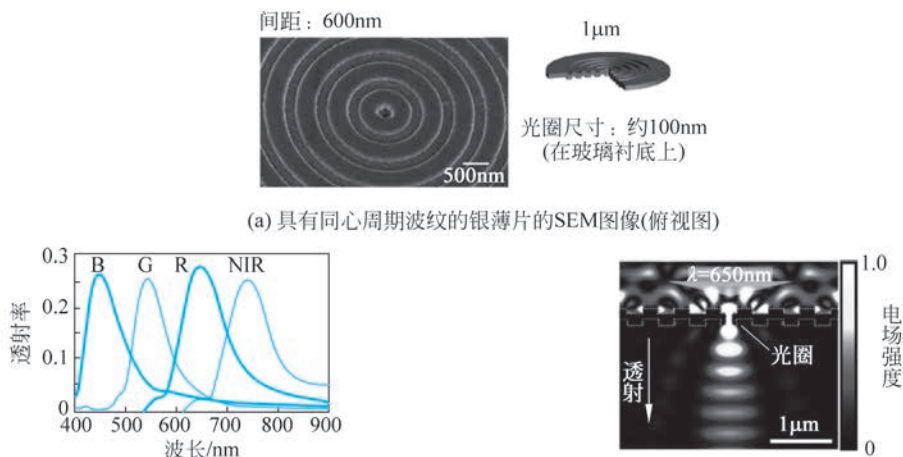
在这两个方程中, 未知参数是输入光照度 $P_o(\lambda_{ex})$ 和 $P_o(\lambda_{fl})$, 可以计算两个输入光照度, 即激发光源强度 $P_o(\lambda_{ex})$ 和荧光光源强度 $P_o(\lambda_{fl})$, 便可以实现无滤波测量。

3.3.5.4 亚波长结构

实现颜色检测的第四方法是使用亚波长结构, 例如一个金属网格或表面等离子体^[287-291]和光子晶体^[167,292], 这些技术还处于起步阶段, 但对于微间距像素的 CMOS 图像传感器可能较为有效。对于亚波长结构, 量子效率对极化、入射光波长和金属网格的形状与材料都非常敏感, 这意味着必须将光视为电磁波来估算它的量子效率。

当孔径 d 比入射光波长 λ 小得多时, 通过孔 T/f 的光传输随着 $(d/\lambda)^4$ ^[293] 而减少, 这就会造成图像传感器的灵敏度呈指数式降低, T/f 即在孔面积 f 上传输光照度 T 归一化后入射光的光照度。T. Thio 等提出了一种传输增强装置, 它是通过在金属表面上被周期性凹槽包围的亚波长孔径实现的^[294]。在这样的结构中, 表面等离子体(SP)模式由入射光的栅极耦合^[295]激发, 表面等离子体共振造成了通过孔径的光传输的增强, 这种传输增强使得具有亚波长孔径的图像传感器的实现成为可能。通过文献[296]给出的计算机仿真结果可以看出, 铝金属网格增强了光传输, 而钨金属网格却没有增强, 金属网格的厚度、布线和间距也会影响传输。

表面等离子体模式的另一种应用是在彩色滤光片中^[290,297]。图 3.32(a)显示了由金属制成的同心周期性波纹结构或牛眼形结构的彩色滤光片。在结构的中心做一个孔, 可以通过改变金属表面的波纹周期来选择光的波长, 如图 3.32(b)所示。



(b) 蓝、绿、红和近红外透射光谱的仿真结果

(c) 入射光波长为650nm时电场强度分布的仿真结果

图 3.32 具有同心圆型周期波纹的金属滤光片^[290] (由静冈大学 Ono 教授提供)

由于表面等离子体滤光片是由金属制成的,因此由于金属的不透明特性,透射率实质上降低了。为了减轻这个问题,已经有研究人员开发出了由介电材料制成的纳米结构的偏转器或分离器^[298-300]。由于纳米偏转器可以由诸如 SiN 的介电材料制成,因此结构是透明的,透射率几乎不降低。另外,诸如 SiN 的材料通常在标准 CMOS 工艺中使用,以使得纳米偏转器与其兼容。这里的一个问题是,不是所有的输入光都会发生偏转,即一部分输入光没有发生偏转。为了解决这个问题,将两个纳米偏转器与图像处理结合使用。

3.4 智能 CIS 的专用像素阵列和光学元件

本节讨论拥有专用像素阵列和专用光学元件的智能 CMOS 图像传感器。传统的智能 CMOS 图像传感器用一个光学透镜将图像聚焦到传感器的成像平面上,在成像平面上有矩阵式正交排列的像素。另外,在一些视觉系统中也采用非正交排列的像素阵列进行成像,一个很典型的例子是人类的视觉系统光感受器的分布不均匀:在中央区(或者称为视网膜中心凹)的像素密度排列紧密,而在周围区像素分布稀疏^[199]。这种结构在某些情况下很有用,因为它可以在一个宽视角中快速地检测到物体,一旦检测到目标物体,眼球就会直接转向目标物体并用视网膜中心区域进行更精确的成像。另一个例子就是昆虫的复眼^[301-302],在昆虫的复眼中,它的复杂的像素排列是与特殊的光学元件相结合的。CMOS 图像传感器的像素排列方式可以做到比 CCD 图像传感器更复杂,因为对于 CCD 图像传感器来说,像素之间的准直排列对电荷的传输有着关键性的影响,一个弯曲排列的像素阵列会造成 CCD 图像传感器电荷转移效率的大幅降低。

本节首先讨论智能 CMOS 图像传感器的一些特殊像素阵列,然后介绍具有专用光学元件的智能 CMOS 图像传感器。

3.4.1 相位差检测自动对焦

具有快速自动对焦功能的 CMOS 图像传感器可以实现在图像平面上完成相位差检测^[303-304]。在传感器中,一些像素用于相位差检测自动对焦(PDAF)。光电二极管的一部分被遮光,因此相位差检测自动对焦的像素无法用于成像。为了减轻这个问题,在像素上制造了分离的微透镜,分割后的微透镜可能产生角度依赖性,因此可以将其用于相位差检测自动对焦,而分离后的信号可以用于成像。此方法对于间距较小的 CMOS 图像传感器十分有效^[305]。

3.4.2 全景成像

全景成像(HOVI)是一种可以拍摄周围所有方向上的图像的成像系统,它可以通过一个传统的 CCD 相机与一个双曲面镜来实现^[306-307]。此成像系统很适合用于监视。输出图像是被反射镜反射得到的,所以存在失真。通常情况下,失真图像被变换到笛卡儿坐标系,进行重新排列,然后显示出来,这样的相机外变换操作限制了它的可应用性。CMOS 图像传感器在像素排列方面具有多样性,因此像素的排列可以经过设计以适应被双曲面镜扭曲的图像,这样可以实现直接的影像输出,无需任何软件转换程序,使得传感器有更广泛的应用。本节将讨论一个用于全景成像的智能 CMOS 图像传感器的结构和特征^[308]。一个传统的全景成像系统通常包括一个双曲面镜、透镜和 CCD 相机。全景成像系统拍摄的图像由于双

曲面镜的原因会发生失真,为获得一个可辨认的图像,必须经过变换过程,这通常由计算机软件来实现。图 3.33 给出了全景成像的成像原理。

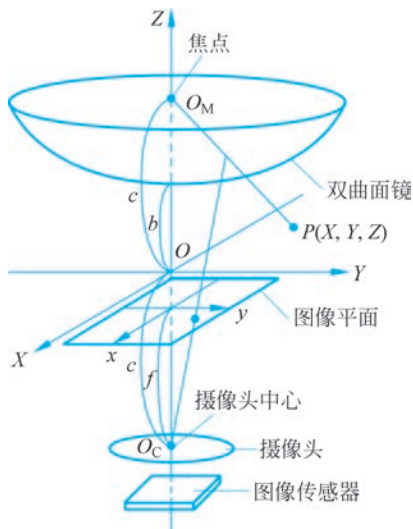


图 3.33 全景成像系统结构(镜面: $\frac{X^2+Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1$ 。f 为焦距)

一个位于 $P(X, Y, Z)$ 的物体通过双曲面镜投射到一个二维图像平面上,坐标为 $p(x, y)$, $p(x, y)$ 的坐标由下式得到:

$$x = \frac{Xf(b^2 - c^2)}{(b^2 - c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (3.27)$$

$$y = \frac{Yf(b^2 - c^2)}{(b^2 - c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (3.28)$$

式中: b 和 c 为双曲面镜的参数; f 为相机的焦距。

根据式(3.27)和式(3.28),将像素排列成放射状来设计智能 CMOS 图像传感器^[308],并在像素电路中使用 3T-APS。芯片的一个特征是像素的间距由外围到中心越来越小,因此,该传感器使用了四种不同尺寸的像素。在放射状结构中,列扫描器和行扫描器分别被放置到沿径向和圆周方向。

图 3.34 给出所制造的芯片的显微照片,图中显示了中心像素的特写图。图 3.34(c)显示了使用 CCD 摄像机的常规全景成像的图像采集,输出图像失真。在图 3.34(d)中,图像被制造的图像传感器捕获,获得没有失真的图像。

3.4.3 受生物学启发的图像传感器

一些动物的眼睛结构与传统图像传感器的结构不同,这些特定的结构具有一些优势,如宽视角(FOV)。本节介绍受生物启发的图像传感器的一些例子。

3.4.3.1 曲面图像传感器

曲面图像传感器是受某些动物眼睛的启发,这些动物眼睛具有弯曲的检测表面。已有研究人员成功研究出模仿它们的曲面的图像传感器^[309-311],如图 3.35 所示。曲面的图像传

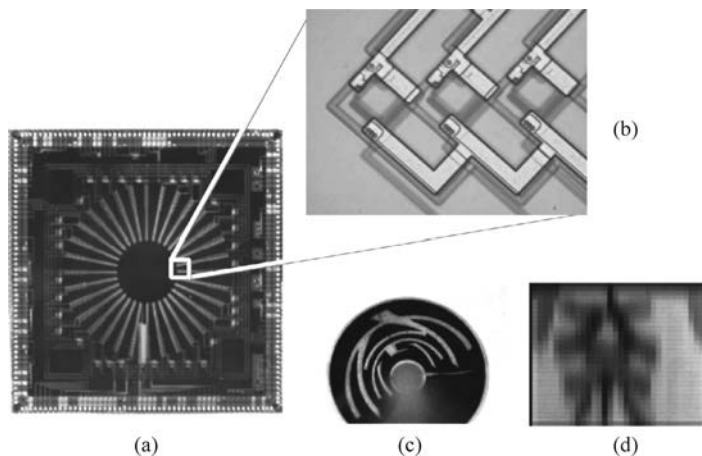


图 3.34 用于全景成像系统的智能 CMOS 图像传感器的显微照片及其特写显微照片、常规全景成像系统输入的汉字字符和其传感器的输出图像

传感器可通过简单的透镜系统实现宽视场角和低像差。文献[310]介绍了一种弯曲的背照式 CMOS 图像传感器,通过曲面传感器可以减少焦距比,从而提高系统灵敏度。另外,当传感器弯曲时,传感器产生拉伸应力,该拉伸应力减小了 Si 的带隙,因此减小了暗电流。对于图像传感器而言,该影响是正向的,性能可以得到提升。

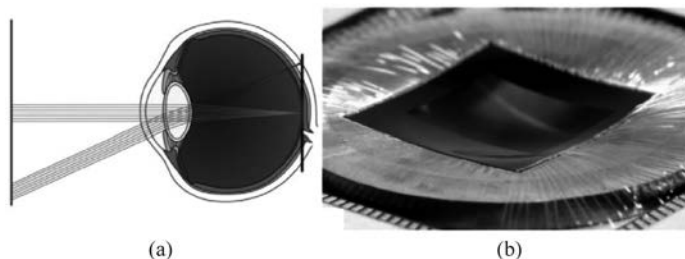


图 3.35 曲面图像传感器(经许可修改自文献[311])

3.4.3.2 复眼

复眼是包括昆虫以及甲壳类动物在内的节肢动物的生物视觉系统。复眼中有大量独立的具有小视角的微小光学系统,具体结构如图 3.36 所示,每只独立的微小眼睛(称为小眼或单眼)所获得的图像在大脑内重组整个图像。

复眼的优点是它的宽视场角、紧凑的体积和很短的工作距离,可实现超薄相机系统。另外,由于一只小眼只需要一个较小的视场角,每只小眼中只需要简单的光学系统。其缺点是分辨率较低。

目前已经有很多组织正在研究仿生复眼^[312-318]。3.4.4 节将介绍基于复眼结构的智能 CMOS 图像传感器的一个例子:大阪大学 J. Tanida 等研制的 TOMBO。

TOMBO 系统是绑定光学元件的薄观测模块(Thin Observation Module by Bound Optics)的首字母缩写,是另外一种复眼系统^[319-320]。图 3.37 给出了 TOMBO 系统的概念。TOMBO 系统的核心引入了大量的光学成像系统,每个光学成像系统中有若干微透镜,也称为光学成像单元,每个光学成像单元用不同的摄影角度拍摄小的完整图像,因此可

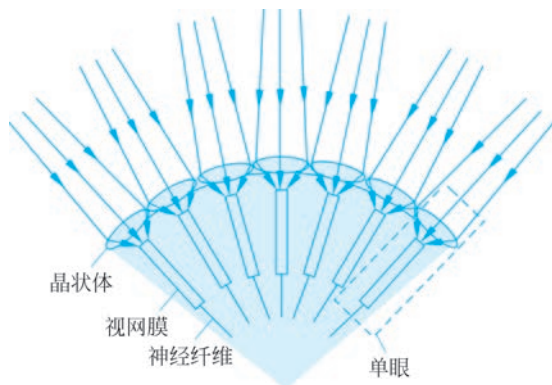


图 3.36 并置复眼系统的概念

注：系统包括大量的小眼，每只小眼拥有一个晶状体（透镜）、视网膜和神经纤维。注意，另一种复眼是神经叠加复眼。

以获得大量的拥有不同拍摄角度的微小图像。一个整体图像可以通过将每个光学成像单元图像整合重建来获得。数字的后端处理算法可以提高合成图像的质量。

实现复眼系统的关键问题是用微光学技术设计小眼结构。在 TOMBO 系统中，图 3.37 所示的信号分离器解决了这个问题，专用于 TOMBO 系统的 CMOS 图像传感器已经得到开发^[119,321]。TOMBO 系统也可用作广角摄像系统和超薄型或紧凑型摄像系统。

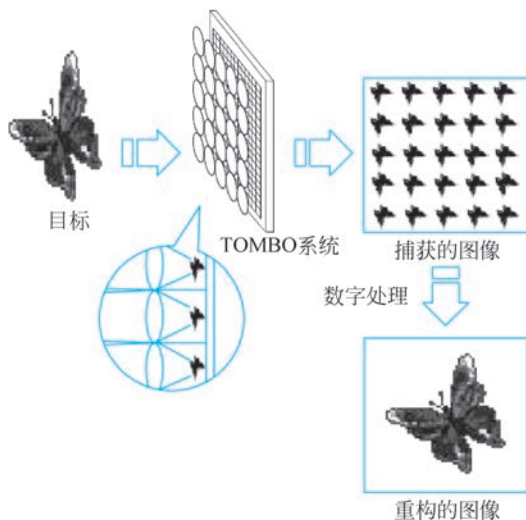


图 3.37 TOMBO 的概念

3.4.4 光场相机

光场相机称为全光相机。光场的概念如图 3.38 所示^[322]，光与 $u-v$ 和 $x-y$ 两个平面相关联，因此与图 3.38(a) 的四个参数 (u, v, x, y) 相关。而传统的图像传感器仅检测二维平面，即 (x, y) 。

光场图像传感器的研究已经取得一定成果，可以检测其他两个参数 (u, v) 。光场图像传感器的概念如图 3.38(b) 所示，成像镜头聚焦在 $x-y$ 表面上[由于图 3.38(b) 是一维图，因此在该图中仅显示了 x 轴]，在图中，根据与透镜之间的入射角，绘制了两条光线，其中一条

是实线,另一条是虚线。在焦平面中,放置了微透镜阵列。透过微透镜的光线投射在图像传感器表面,在 u - v 平面上坐标为 u 。此投影图像平面或图像传感器平面是透镜平面图像,但是每个微透镜都对应于光线的方向。由于所有光线都记录在此传感器中,因此可以重建聚焦平面,并且通过记录光线的方向,可以重建三维图像^[322],这是 4.6 节将介绍的三维测距仪内容。

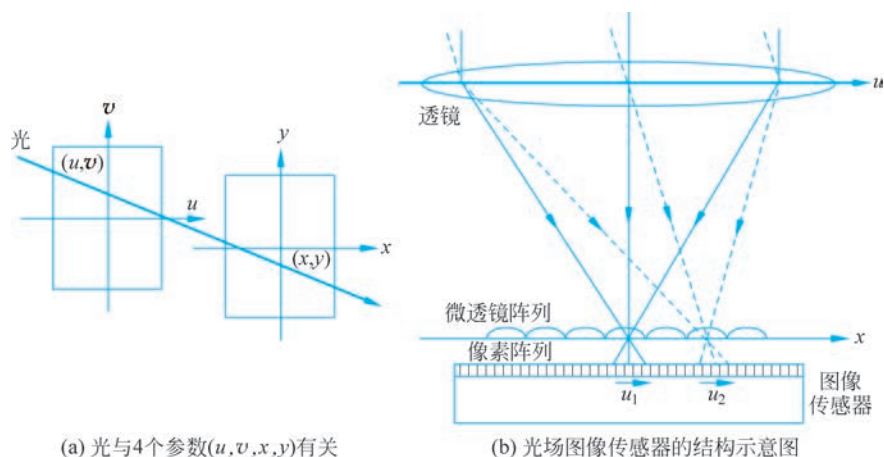


图 3.38 光场图像传感器的概念

将具有较小像素间距的图像传感器中的微透镜阵列进行对准较为困难。如图 3.39 所示, Wang 等通过在图像传感器的表面上使用两组衍射光栅阵列,证明了光场图像传感器的可行性^[323-325]。衍射光栅是通过在标准 CMOS 工艺流程中在相互连接的金属层中使用金属线制成的,该工艺类似于 3.4.5 节介绍的集成偏振图像传感器。在这种传感器中,两个光栅层被嵌入传感器中,并且可以检测输入光的入射角,此特性可以实现三维图像,其像素称为角度敏感像素(ASP)^[323]。输入光被顶部金属光栅衍射,并在第二光栅的深层产生干涉图样,第二光栅通过或阻碍干涉图案,由于干涉图案的位置取决于输入光的入射角,因此像素实现了角度敏感像素功能。

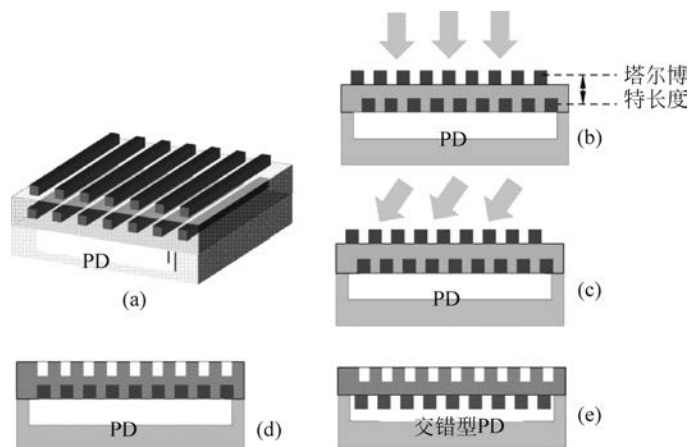


图 3.39 基于塔尔博特效应的图像传感器的结构示意图^[323]

通过使用衍射光学元件,研究人员已经开发出了另一种类型的光场图像传感器^[326]。在这种情况下,左、右光束可以通过双凸透镜作为分束器进行分离,而数字微透镜则作为聚焦增强器。数字微透镜基于衍射光学器件,原理结构将在 4.6.3.1 节进行详细介绍。

3.4.5 偏振成像

偏振是光的一种特性^[302]。偏振成像利用光的偏振特性,可以应用在需要更高清晰度的目标检测领域。例如,通过偏振成像可以清晰地拍摄到玻璃上的反射图像。另外,偏振成像还可以用于测量透明材料的二维双折射分布,该分布显示了材料内部的残余应力。Sarkar 和 Theuwissen^[327]详细描述了偏振成像。通过将双折射材料,例如聚乙烯醇(PVA)^[328-329]、金红石(TiO_2)晶体^[330]、钽酸钒(YVO_4)晶体^[331]、液晶聚合物(LCP)^[332]和光子晶体^[333]放在传感器表面上,一些类型的偏振图像传感器得到了初步发展。偏振器的另一种类型是金属线栅,如图 3.40 所示。当线偏振光照射到金属线上且金属线间距远小于光的波长时,与栅格平行的光的强度会衰减,因为它会激发栅格中的振荡电流,其中一些电流会转换为热量,剩余的会产生与输入电场反相的电场。相反,垂直于栅格阵列的线偏振光几乎不衰减。线栅偏振器被广泛用于近红外领域,因为近红外光不需要栅距。双折射材料在可见光区域显示出优异的偏振特性,然而将材料与图像传感器整合较为困难。

在 2008 年,奈良先端科学技术大学院大学(NAIST)课题组提出在 CMOS 工艺流程中使用金属线作为线栅,并成功展示了其在分析偏振方面的用途^[334],如图 3.41 所示。其他一些课题组也证明了相同的结构^[335-337]。

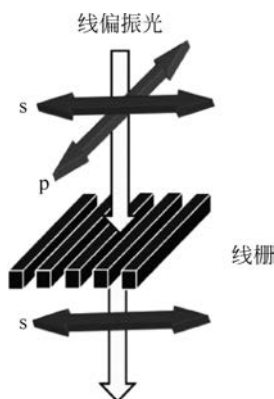


图 3.40 金属线栅偏振器的概念性图示

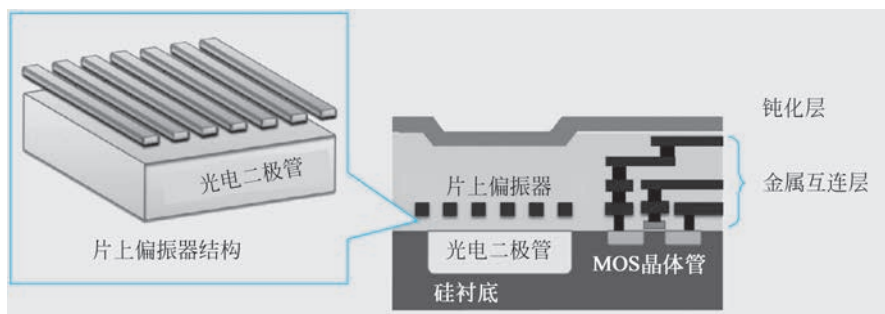


图 3.41 偏振检测图像传感器结构

因为可以将用于布线的金属层用作线栅偏振器,所以该结构适合于 CMOS 制造流程。诸如 65nm CMOS 工艺的精细制造工艺更适合于线栅偏振器,其与 $0.35\mu\text{m}$ 或 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 工艺相比,具有更高的消光比(ER)^[338]。在这里,消光比定义为角剖面中最大归一化强度与最小归一化强度之比,这是偏振器的性能参数。图 3.42 显示了在 65nm CMOS 工

艺中使用偏振图像传感器捕获的具有局部偏振变化的图像的实验结果^[339]。表 3.3 总结了集成偏振 CMOS 图像传感器(包括基于 CCD 的传感器)的规格。

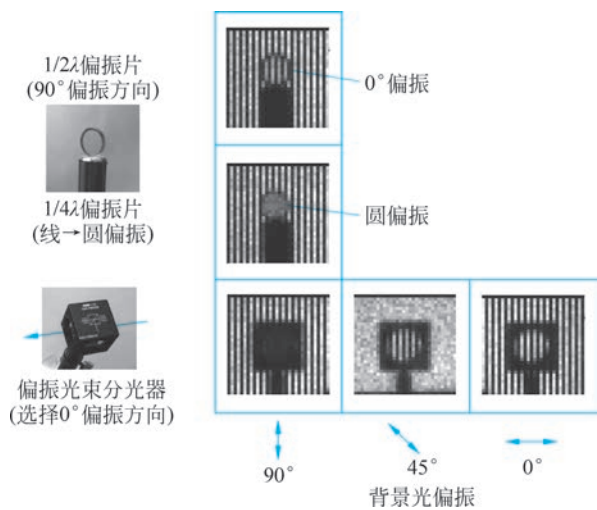


图 3.42 具有局部偏振变化的拍摄图像^[339]

表 3.3 偏振图像传感器的规格比较

归属	年份	传感器	方向/(°)	(栅 L/S)/nm	材料	制造方法	消光比/dB	参考文献
约翰斯·霍普金斯大学	1996	2μm 标准 CMOS(PT _r)	0,90	—	图案化 PVA	分离	—	[328]
	1998	1. 2μm 标准 CMOS(PT _r)	0,90	—	图案化双折射晶体	分离	—	[330]
纽约州立大学	2006	1. 5μm 标准 CMOS(PT _r)	0,90	—	图案化双折射晶体	分离	—	[331]
东北大学和光子晶体株式会社	2007	CCD	0,45,90,135	—	介质光子晶体	分离	40	[333]
奈良先端科学技术大学院大学	2008	0. 35μm 标准 CMOS (3T-APS)	0~180 (步长 1°)	600/600	CMOS 金属线	CMOS 工艺	3	[334]
	2013	65nm 标准 CMOS (3T-APS)	0,90	100/100	CMOS 金属线	CMOS 工艺	19	[338]

续表

归属	年份	传感器	方向/(°)	(栅 L/S)/nm	材料	制造方法	消光比/dB	参考文献
宾夕法尼亚大学	2008	0.18 μm 标准 CMOS(改进型 3T-APS)	0,45	—	图案化 PVA	分离	17	[329]
	2014	65nm 标准 CMOS (3T-APS)	0,45,90	90/90	CMOS 金属线	CMOS 工艺	17	[341]
代尔夫特理工大学和欧洲微电子研究中心	2009	0.18 μm CIS CMOS (4T-APS)	0,45,90	240/240	CMOS 金属线	CMOS 工艺	8.8	[342]
华盛顿大学和伊利诺伊大学	2010	CCD	0,45,90,135	70/70	铝纳米线	分离	60	[343]
	2014	0.18 μm CIS CMOS (4T-APS)	0,45,90,135	70/70	铝纳米线	分离	60	[344]
亚利桑那州立大学	2012	CCD	0,45,90,135	—	图案化 LCP	分离	14	[332]
索尼	2018	90nm 背照式 CIS CMOS (4T-APS)	0,45,90,135	50/100	气隙线栅	片上后期处理	85	[340]

使用 0.35 μm 工艺标准 CMOS 技术的集成线栅阵列的偏振图像传感器具有较低的消光比,因为线栅间距与可见光波长相当。为了利用这种低消光比,微偏振器在每个角度上的网格取向为 0°~180°,并重复此设置,使波动更为平滑。图 3.43 显示了嵌入微偏振器的像素阵列,其方向在 0°~180°之间变化。在 5.3.1 节中,这种偏振 CMOS 图像传感器的类型被证明可应用于化学,在化学应用中,偏振通常用于识别化学物质。

在芯片上嵌入了线栅的集成 CMOS 偏振图像传感器首次实现了商业化^[337-340],可应用于工业,例如检查玻璃上的划痕和污垢。线栅型偏振器集成在传感器芯片上,每条线栅都用气隙代替绝缘体隔开,以确保入射光的波长在线栅内部不发生变化。另外,由于铝的吸收系数比铜还要低,因此线栅由铝而不是通常用作金属布线层的铜制成。

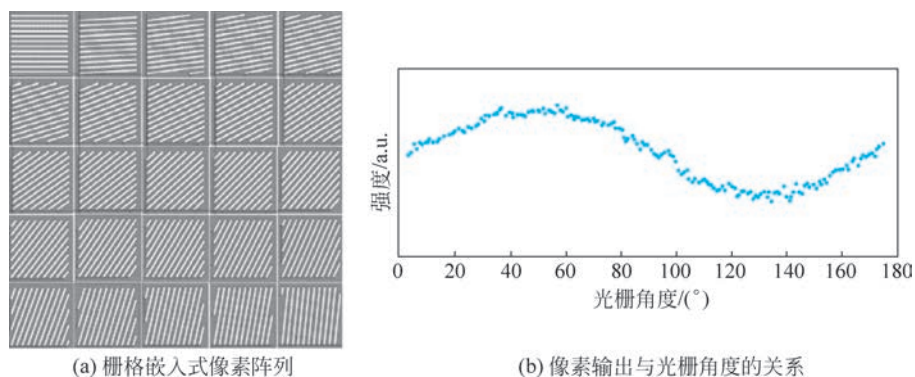


图 3.43 偏振检测图像传感器

3.4.6 无透镜成像

无透镜成像是没有任何透镜的成像系统。常规透镜是折射透镜,而非涅耳透镜是衍射透镜。这里,无透镜成像不包括有衍射透镜的成像系统。无透镜成像系统分为两种类型^[345],如图 3.44 所示。

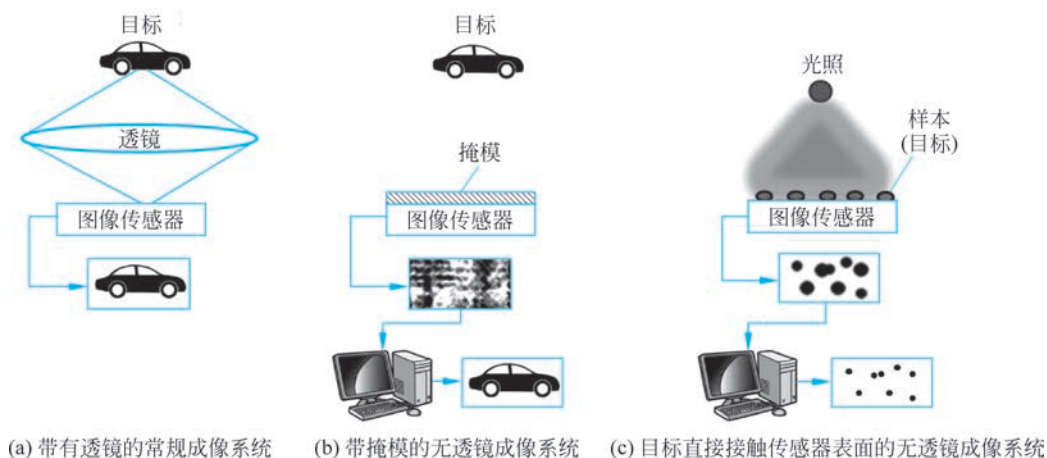


图 3.44 无透镜成像的概念图

3.4.6.1 编码孔径相机

在传感器表面上或靠近传感器表面放置掩模,以此调制输入图像的无透镜成像系统[图 3.44(b)]称为编码孔径无透镜成像系统^[346-352],该掩模表现为多针孔阵列^[347]。针孔照相机是第一款无透镜照相机,但是具有光利用效率低的缺点。为了克服这个缺点,已经出现了编码孔径的方法。

编码孔径相机最初用于 X 射线和 γ 射线成像,因为在这些波长区域中不存在合适的透镜材料^[347-348]。编码孔径在空间上对图像进行编码,并且检索^[347]。记录的图像 R 是物体 O 与光圈 A 之间的卷积,或者 $R = O \times A$ 。解码处理 G 将原始图像恢复为 $R \otimes G = \hat{O}$ 。因此,恢复的原始图像 O 表示为

$$\hat{O} = R \otimes G = (O \times A) \otimes G = O * (A \otimes G) \quad (3.29)$$

因此可得,

$$\text{if } A \otimes G = \delta \text{ (delta function), then } \hat{O} = O \quad (3.30)$$

为了以最小的计算量最大程度地检索原始图像,在光圈设计中满足式(3.30)至关重要。已经有研究人员开发了均匀冗余阵列^[346]、伪噪声模式^[351]、平面傅里叶捕获阵列(PFCA)^[349]、螺旋模式^[350]以及菲涅耳区域^[352]等光圈设计方法。

通过利用无透镜照相机,已经有诸如 FlatCam^[351]、PicoCam^[350] 和其他^[349] 紧凑型照相机得到报道。在 FlatCam 中,将编码的掩模放置在靠近传感器表面的位置(距离为 0.5mm),从而可以实现薄型形状因数^[351]。在 PicoCam 中,编码孔径是由玻璃制成的相位光栅,因此与幅度编码孔径相比,光损失得以减少。在文献[349]中已经报道了 CMOS 图像传感器中的集成编码孔径,在这种情况下可以实现芯片大小的相机。采用常规 CMOS 制造工艺中使用的金属层来制造编码孔径图案,其结构与图 3.39 中基于塔尔博特效应的光场传感器中的结构相同,因此光栅图案以正弦强度调制输入图像。为了实现编码孔径阵列,如图 3.43(a)所示,以不同的倾斜角放置每个像素中的光栅图案,并设置不同的光栅间距。每个像素都以入射角正弦地调制输入图像的强度,所有像素都可以实现完整的二维傅里叶变换。这些带有编码的紧凑型相机与传统有透镜的相机相比的主要缺点是分辨率较低,增加像素数在某种程度上可以减轻该缺点。

在编码孔径相机中,图案在空间上是固定的,但是某些类型的编码孔径引入了可编程孔径^[353-355]。空间光调制器(SLM)用作可编程编码孔径,可以在每个像素中独立地控制透明度。通过引入可编程的编码孔径,可以在成像期间实现瞬时视场变化、视场分裂和光学计算^[353]。作为相机用作计算传感器的示例,可以执行相关的光学处理以在可编程编码孔径上显示相关模板图像。

3.4.6.2 直接接触型

在直接接触型的无透镜成像系统中,要确保与目标直接接触或紧密接触以产生图像^[356-358]。这种类型的主要应用是观察细胞,例如在光学显微镜中^[357],并在微流控装置或流式细胞仪中检测特定的细胞^[359-360]。若没有镜头,则可以实现尺寸紧凑的大视场。该类型进一步分类为基于衍射的成像(或阴影成像)和接触模式成像方法。基于衍射的成像方法是由 Ozcan 等开发的,通过使用全息方法来提高空间分辨率^[357],当光从上方照射到细胞上时,散射光和直射光会受到干涉,并产生干涉图样或全息图样。为了分析这种模式,将其与直接投影类型相对比,其可以更好地增强空间分辨率。带有无透镜图像传感器的光学显微镜紧凑且具有大的视场。此外,它还可以应用于流式细胞仪,该流式细胞仪用于检测微流控设备中正在生长的细胞中特定类型的细胞。在常规的流式细胞仪中,放置相机以检测特定细胞,通过引入无透镜成像系统,可以减小系统的总体积,从而可以应用于“即时医护”(POC)。

接触模式成像的另一种方法是将目标直接放置在传感器表面上生成图像^[362-363]。这种类型主要用于荧光成像,因为荧光在每个方向上发射的波长都与激发光的波长不同,因此不会产生干涉,很难应用全息方法。在这种情况下,分辨率的降低更为关键,因为通过在传感器表面上插入发射滤光片以消除激发光,可以在目标和传感器表面之间产生更多的空间。图 3.45 显示了荧光成像的接触类型^[361]。为了抑制激发光强度而不是荧光强度,已经出现了使用棱镜^[364]、纳米等离子滤光片^[365]、干涉滤光片^[363]、光导管结构^[366],将吸收和干涉

滤光片结合在一起使用^[362,367]等方法。斯托克斯位移很大时,抑制激发光并不难。斯托克斯位移是指激发光的峰值波长与荧光的峰值波长之差。例如,Hoechst 3342 中激发光和荧光之间的峰值波长差约为 120nm,而在绿色荧光蛋白质(GFP)中约为 30nm。因此,在这种情况下,与 Hoechst 3342 相比,检测 GFP 更加困难。

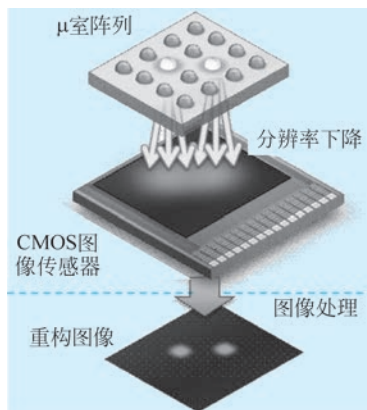


图 3.45 基于直接接触法的无透镜成像系统(经许可修改自文献[361])

注: 在这种情况下,使用纤维光学板以最小的图像失真程度传输图像。