

6.3 热释电器件



- 1. 热释电效应发现于18世纪
- 2. 1938年日本Yeoy Ta首次利用热释电效应探测红外辐射
- 3. 1956年贝尔实验室Chynoweth用动态法研究钛酸钡的热释电效应，开创了实用化红外探测器的局面
- 4. 1962年英国的Cooper从理论计上得出结论钛酸钡热释电探测器在居里温度附近（381K）的噪声等效功率优于其它类型热敏探测器
- 5. 1969年英国的Putley系统论述了热释电探测器的工作原理

6.3 热释电器件

热释电器件是一种利用热释电效应制成的热探测器件。与其它热探测器相比，具有以下优点：

- ① 较宽的频率响应，工作频率接近兆赫兹，远远超过其它热探测器。一般热探测器的时间常数在 $1\sim 0.01\text{s}$ 范围内，热释电器件的时间常数可低达 $10^{-4}\sim 3\times 10^{-5}\text{s}$ ；
- ② 探测率高，热探测器中只有气动探测器的 D^* 才比热释电器件稍高，且这一差距正在不断减小；
- ③ 具有大面积均匀的敏感面，且工作时可不外加偏置电压；
- ④ 与热敏电阻相比，它受环境温度变化的影响更小；
- ⑤ 强度和可靠性比其它热探测器都要好，且制造比较容易。

6.3.1 热释电器件的基本工作原理

1. 热释电效应

电介质内部没有自由载流子，没有导电能力。但是，它也由带电的粒子（价电子和原子核）构成，在**外加电场**的情况下，**带电粒子也要受到电场力**的作用，使其运动发生变化。

如图6-11所示的电介质上下两侧加上电场后，电介质产生极化现象，从电场加入到电极化状态建立时间内电介质内部电荷做适应电场的运动，相当于电荷沿电力线方向运动，也是一种电流称为“**位移电流**”，该电流电极化完成。

电介质，**电场去除极化**状态随即消失，带电粒子又恢复原来状态。

“**铁电体**”电介质去除外加电场后保持着极化状态，称其为“**自发极化**”。

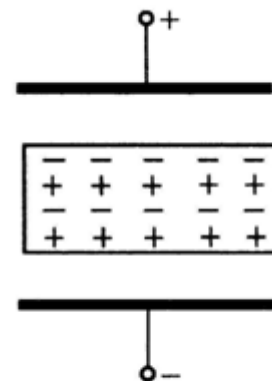


图6-11 电极化现象

图6-12所示为一般的电介质与铁电体电介质的极化曲线。

一般电介质极化曲线通过中心，而图6-12（b）所示极化曲线在电场去除后仍保持一定的极化强度。

铁电体的自发极化强度 P_s

（单位面积上的电荷量）与温度的关系如图6-13所示，随着温度的升高，极化强度减低，升高到一定值，自发极化突然消失，该温度被称为“居里温度”或“居里点”。

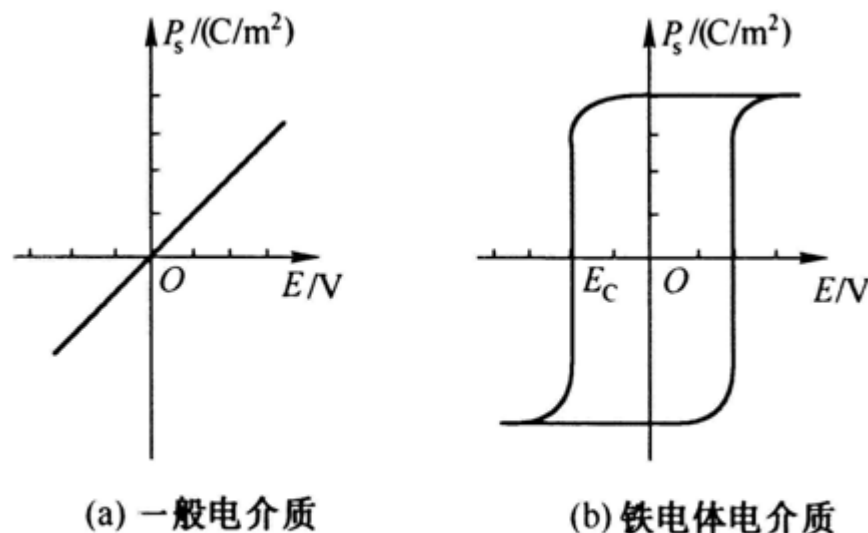
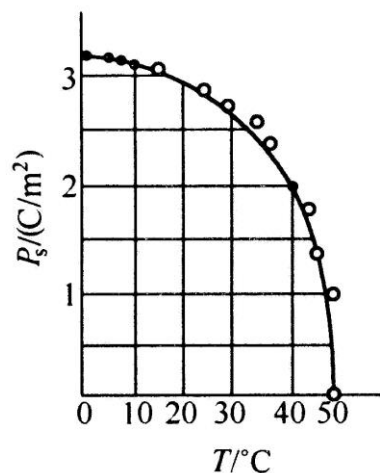


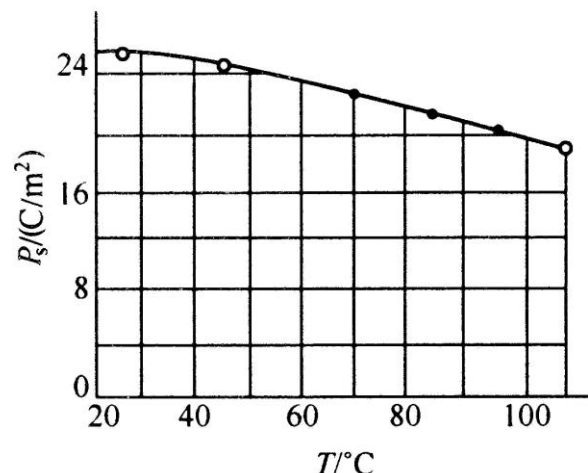
图6-12 电介质的极化曲线

在居里点以下，极化强度 P_s 是温度 T 的函数。

利用这一关系制造的热敏探测器称为热释电器件。



(a) TGS材料



(b) BaTiO₂材料

图6-13 自发极化强度随温度变化的关系曲线

当辐射作用于极化的铁电体薄片，引起薄片温升，表面电荷减少，相当于热“释放”了电荷。

释放的电荷可用放大器转变成电压输出。

如果辐射持续作用，表面电荷将达到平衡，不再释放电荷，也不再有电压信号输出。

特点：在恒定辐射作用下输出信号电压为零。

只有在**交变辐射**的作用下才会有信号输出。

对于经过单畴化的热释电晶体，在垂直于极化方向表面上，将由表面层的电偶极子构成相应的静电束缚电荷。面束缚电荷密度 σ 与自发极化强度 P_s 之间的关系可由(6-34)式确定。

$$P_s = \frac{\sum \sigma \Delta s \Delta d}{Sd} = \sigma \quad (6-34)$$

式中， S 和 d 分别是晶体的表面积和厚度。

如6-14(a)所示。由内部自由电荷中和表面束缚电荷的时间常数为 $\tau = \varepsilon\rho$ ， ε 和 ρ 分别为晶体的介电常数和电阻率。

使热释电晶体在面束缚电荷被中和掉之前因吸收辐射而发生变化，晶体的自发极化强度 P_s 就会随温度 T 变化，束缚电荷面密度 σ 也随之变化，如图6-14(b)所示。

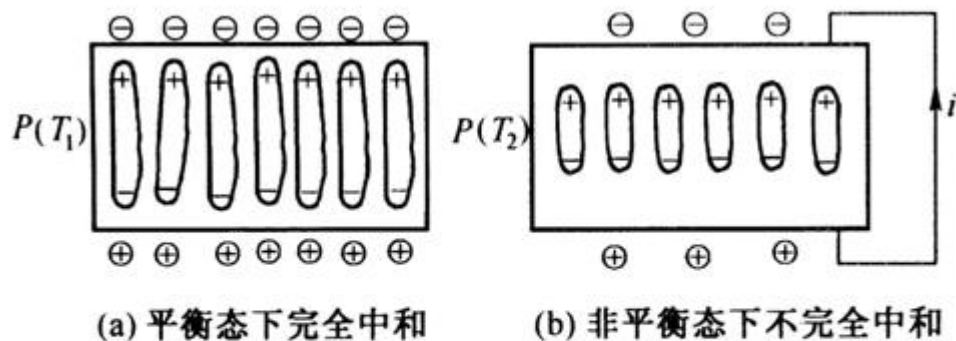


图 6-14 热释电晶体的内部电偶极子和外部自由电荷的补偿情况

2. 热释电器件的工作原理

设晶体自发极化矢量为 \mathbf{P}_s ， \mathbf{P}_s 方向垂直于电容器的极板平面。接收辐射的极板和另一极板的重迭面积为 A_d 。由此引起表面上的束缚极化电荷为

$$Q = A_d \Delta \sigma = A_d P_s \quad (6-35)$$

若辐射引起的晶体温度变化为 ΔT ，则相应的束缚电荷变化为

$$\Delta Q = A_d (\Delta P_s / \Delta T) \Delta T = A_d \gamma \Delta T \quad (6-36)$$

式中， $\gamma = \Delta P_s / \Delta T$ 称为热释电系数，其单位为 $\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$ ，与材料本身特性有关的物理量，表示自发极化强度随温度的变化率。

若在晶体两个相对极板上敷上电极，在两极间接上负载 R_L ，则负载上就有电流通过。**温度变化**在负载上产生的**电流**可表示为

$$i_s = \frac{dQ}{dt} = A_d \gamma \frac{dT}{dt} \quad (6-37)$$

为热释电晶体的温度随时间的变化率，温度变化速率与材料的吸收率和热容有关，吸收率大，热容小，则温度变化率大。

通常热释电器件的电极按照性能的不同要求做成如图6-15所示的面电极和边电极两种结构。

图6-15（a）为面电极结构，电极置于热释电晶体的前后表面，其中一个电极为光敏面。

图6-15（b）为边电极结构，电极所在的平面与光敏面垂直，电极间距较大，面积较小，极间电容较小，用于高速器件。

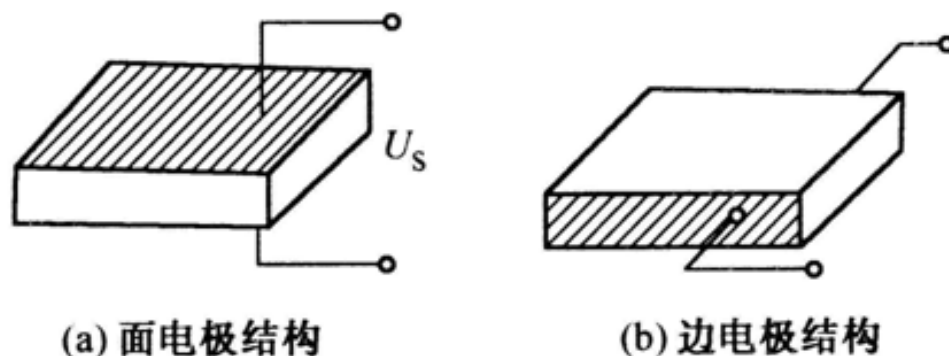


图 6-15 热释电的电极结构

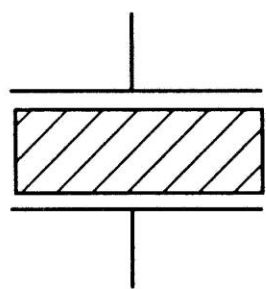
热释电器件产生的热释电电流在负载电阻 R_L 上产生的电压为

$$U = i_d R_L = \left(\gamma A_d \frac{dT}{dt} \right) R_L \quad (6-38)$$

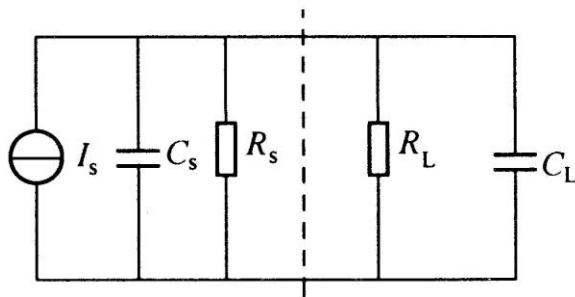
可见，热释电器件的电压响应正比于热释电系数和温度的变化速率 dT/dt ，而与晶体和入射辐射达到平衡的时间无关。

如果将热释电器件跨接到放大器的输入端，其等效电路为如图5-16(b)所示。由等效电路可得等效负载电阻为

$$R_L = \frac{1}{1/R + i\omega C} = \frac{R}{1 + i\omega RC} \quad (6-39)$$



(a) 图形符号



(b) 等效电路

图6-16 热释电器件

这里， $R(=R_s//R_L)$ 和 $C(=C_s+C_L)$ 分别为热释电器件和放大器的等效电阻和等效电容。则 R_L 的模值为

$$|R_L| = \frac{R}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} \quad (6-40)$$

对于热释电系数为 λ ，电极面积为 A 的热释电器件，其在以调制频率为 ω 的交变幅射照射下的温度可以表示为

$$T = |\Delta T_\omega| e^{j\omega t} + T_0 + \Delta T_0 \quad (6-41)$$

式中， T_0 为环境温度， ΔT_0 表示热释电器件接收光辐射后的平均温升，表示与时间相关的温度变化。于是热释电器件的温度变化率为

$$\frac{dT}{dt} = \omega |\Delta T_\omega| e^{j\omega t} \quad (6-42)$$

输入到放大器的电压为

$$U = \gamma A_d \omega |\Delta T_\omega| \frac{R}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} e^{j\omega t} \quad (6-43)$$

由热平衡温度方程（参见6.1节）可知

$$|\Delta T_{\omega}| = \frac{\alpha \Phi_{\omega}}{G(1 + \omega^2 \tau_H^2)^{1/2}} \quad (6-44)$$

式中， $\tau_H = H/G$ 为热释电器件的热时间常数。

将(6-44)代入(6-43)式，可得输出电压的幅值为

$$|U| = \frac{\alpha \omega \gamma A_d R}{G(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_H^2)^{1/2}} P_{\omega} \quad (6-45)$$

式中， $\tau_e = RC$ 为电路时间常数， $R = R_s // R_L$ ， $C = C_s + C_L$ 。 $\tau_T = C_H/G$ 为热时间常数。 τ_e 、 τ_T 的数量级为0.1~10s左右。 A_d 为光敏面的面积， α 为吸收系数， ω 为入射辐射的调制频率。

6.3.2 热释电器件的灵敏度

根据光电器件灵敏度的定义，热释电器件的电压灵敏度 S_v 为输出电压的幅值 U 与入射光功率之比，由式(6-45)可得电压灵敏度为

$$S_v = \frac{A\alpha\gamma\omega R}{G(1 + \omega^2\tau_T^2)^{1/2}(1 + \omega^2\tau_e^2)^{1/2}} \quad (6-46)$$

灵敏度特性:

(1) 当入射为恒定辐射, 即 $\omega=0$ 时, $S_v=0$, 说明热释电器件对恒定辐射不灵敏;

(2) 在低频段 $\omega < 1/\tau_T$ 或 $1/\tau_e$ 时, 灵敏度 S_v 与 ω 成正比, 为热释电器件交流灵敏的体现。

(3) 当 $\tau_e \neq \tau_T$ 时, 通常 $\tau_e < \tau_T$, 在 $\omega = 1/\tau_T \sim 1/\tau_e$ 范围内, S_v 与 ω 无关;

(4) 高频段 ($\omega > 1/\tau_T$ 、 $1/\tau_e$) 时, S_v 则随 ω^{-1} 变化。

因此在许多应用中, 该式的高频特性近似为

$$S \approx \frac{\alpha\gamma A_d}{\omega HC} \quad (6-47)$$

即灵敏度与信号的调制频率 ω 成反比。

6.3.3 热释电器件的噪声

热释电器件的基本结构是一个电容器，因此输出阻抗很高，所以它后面常接有场效应管，构成源极跟随器的形式，使输出阻抗降低到适当数值。因此在分析噪声的时候，也要考虑放大器的噪声。这样，热释电器件的噪声主要有电阻的热噪声、温度噪声和放大器噪声等。

1 热噪声

电阻的热噪声来自晶体的介电损耗和与探测器的并联电阻。

若等效电阻为 R_{eff} ，则热噪声电流的方均值为

$$\overline{i_R^2} = 4 k T_R \Delta f / R_{\text{eff}} \quad (6-48)$$

式中， k 为波耳兹曼常数， T_R 为器件的温度， Δf 为系统的带宽。

热噪声电压为

$$\sqrt{U_{\text{NJ}}^2} = \frac{(4kTR\Delta f)^{1/2}}{(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/4}} \quad (6-50)$$

当 $\omega^2 \tau_e^2 \gg 1$ 时，上式可简化为

$$\sqrt{U_{\text{NJ}}^2} = \left(\frac{4kTR\Delta f}{\omega \tau} \right)^{1/2} \quad (6-51)$$

表明热噪声电压随调制频率的升高而下降。

2 放大器噪声

放大器噪声来自放大器中的有源元件和无源器件，及信号源的阻抗和放大器输入阻抗之间噪声的匹配等方面。设放大器的噪声系数为 F ，把放大器输出端的噪声折到输入端，认为放大器是无噪声的，这时，放大器输入端的噪声电流方均值为

$$I_k^2 = 4k(F-1)T\Delta f/R \quad (6-52)$$

式中， T 为背景温度。

- 3 温度噪声

温度噪声来自热释电器件的灵敏面与外界辐射交换能量的随机性，噪声电流的方均值为

$$\overline{I_T^2} = \gamma^2 A^2 \omega^2 \Delta \overline{T^2} = \gamma^2 A_d^2 \omega^2 \left(\frac{4kT^2 \Delta f}{G} \right) \quad (6-53)$$

式中， A 为电极的面积， A_d 为光敏区的面积， $\overline{T^2}$ 为温度起伏的方均值。如果这三种噪声不相关，则总噪声为

$$\begin{aligned} \overline{I_N^2} &= \frac{4kT\Delta f}{R} + \frac{4kT(F-1)\Delta f}{R} + \frac{4kT^2\gamma^2 A_d^2 \omega^2 \Delta f}{G} \\ &= \frac{4kT_N\Delta f}{R} + \frac{4kT^2\gamma^2 A_d^2 \omega^2 \Delta f}{G} \end{aligned}$$

式中， $T_N = T + (F-1)T$ ，称为放大器的有效输入噪声温度。

考虑统计平均值时的信噪功率比为

$$SNE = \frac{I_S^2}{I_N^2} = \Phi^2 / (4kT^2 G \Delta f / \alpha^2 + 4kT_N G^2 \Delta f / \alpha^2 \gamma^2 A^2 \omega^2 R) \quad (6 - 54)$$

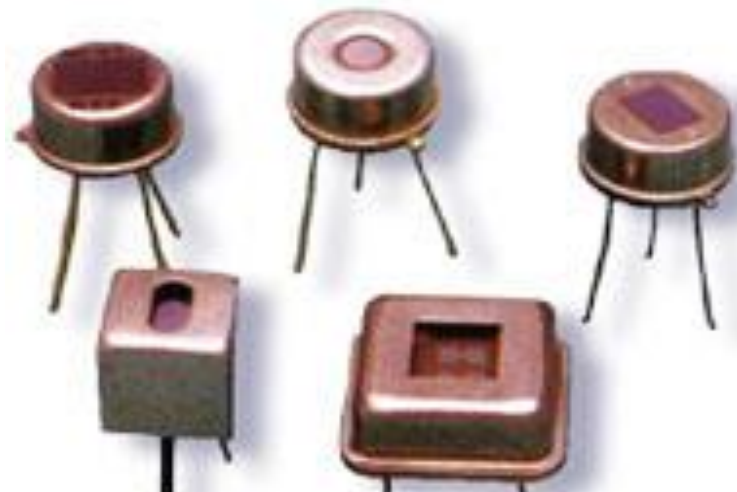
如果温度噪声是主要噪声源而忽略其它噪声时，噪声等效功率为

$$(NEP)^2 = (4kT^2 G^2 \Delta f / \alpha^2 A^2 \gamma^2 \omega^2 R) [1 + (T_N/T)^2] \quad (6 - 55)$$

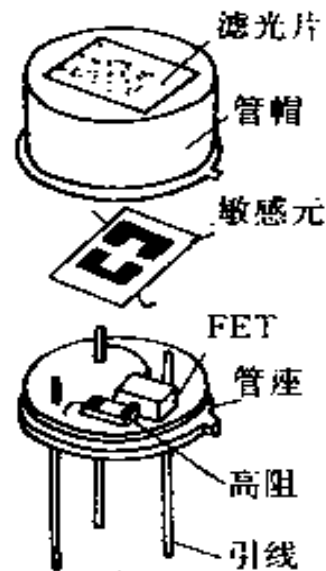
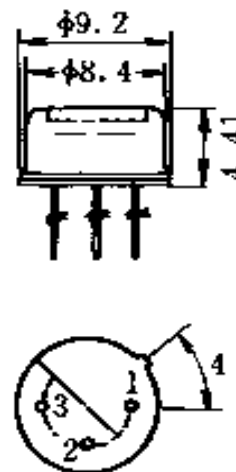
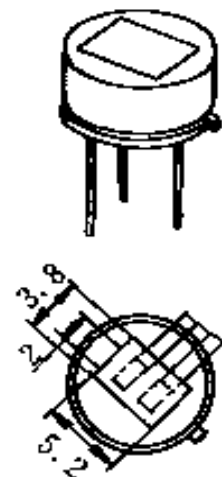
由上式可以看出，热释电器件的噪声等效功率NEP具有随着调制频率的增加而减小的性质。

1. 热释电红外传感器的结构

- 常见的热释电红外传感器的外形如图所示。
- 热释电红外传感器由敏感元、场效应管、高阻电阻等组成，并向壳内充入氮气封装起来，内部结构如下图所示。敏感元也有做成上下两层的。



常见热释电红外传感器的外形

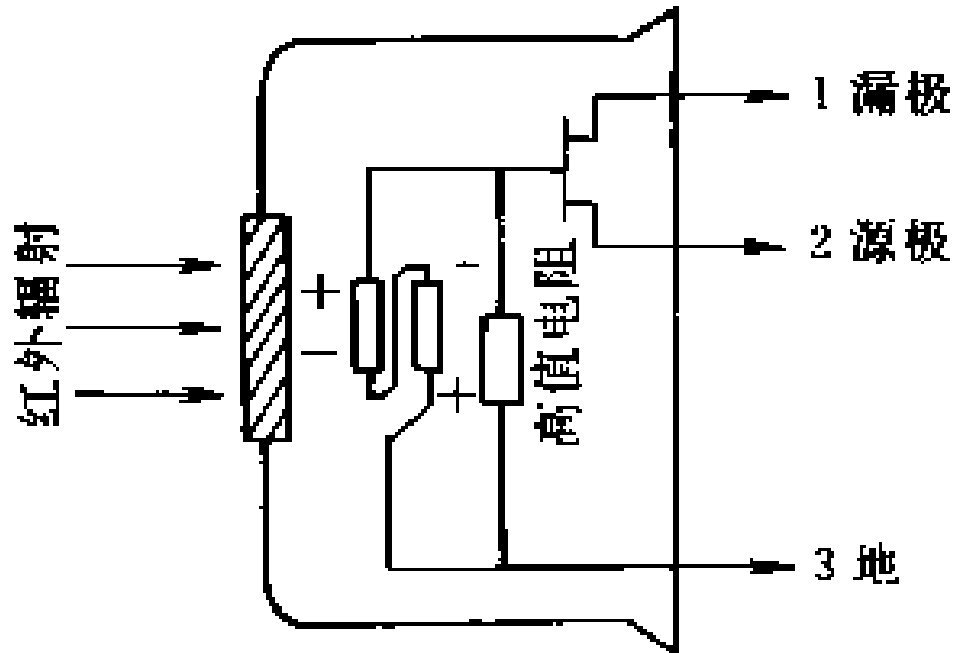


热释电传感器的内部结构

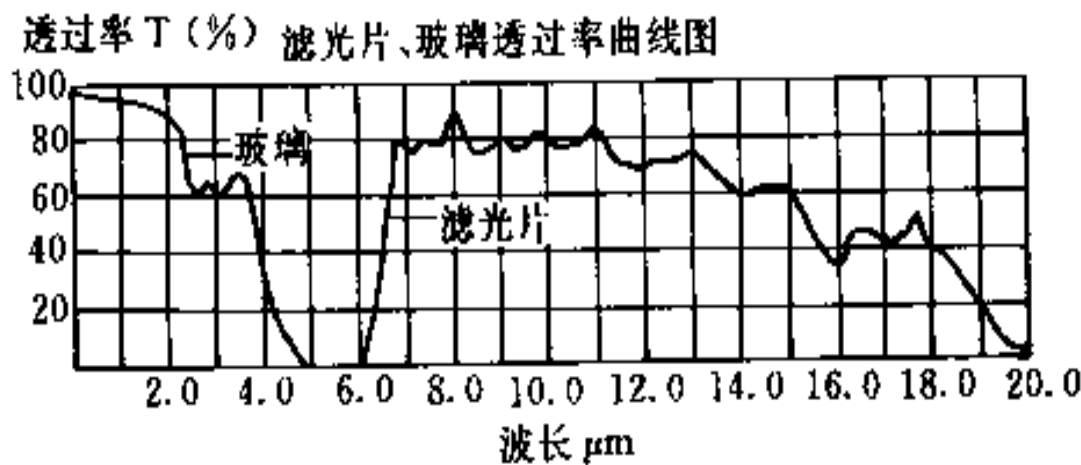
- (1) 敏感元
- 敏感元用红外热释电材料 — 锆钛酸铅(PZT)制成，经极化处理后，其剩余极化强度随温度 T 升高而下降。制作敏感元件时，将热释电材料制成很小的薄片，再在薄片两面镀上电极，构成两个串联的、有极性的小电容。把两个极性相反的热释电敏感元做在同一晶片上，由于温度的变化影响，整个晶片产生温度变化时，两个敏感元产生的热释电信号互相抵消，起到补偿作用。
- 使用热释电传感器时，通常要在使用菲涅尔透镜将外来红外辐射通过透镜会聚光于一个传感元上，它产生的信号不会被抵消。
- 热释电传感器的持点是它只在由于外界的辐射而引起它本身的温度变化时，才会给出一个相应的电信号，当温度的变化趋于稳定后，就再没有信号输出，即热释电信号与它本身的温度的变化率成正比。因此，热释电传感器只对运动的人体或物体敏感。

(2) 场效应管及高阻值电阻 R_g

敏感元的阻值可达 $10^{13}\Omega$ ，因此需用场效应管进行阻抗变换才能应用。场效应管常用2SK303V3，2SK94X3等型号，用来构成源极跟随器。高阻值电阻 R_g 的作用是释放栅极电荷，使场效应管安全正常工作，源极输出接法时，源极电压约0.4—1.0V。如传感器内部接线图如下图所示。



传感器内部接线图



红外滤光片透射曲线

(3) 滤光片(FT)

PZT制成的敏感元件是一种光谱材料，能探测各种 波长辐射。为了使传感器对人体最敏感，而对太阳、电灯光等有抗干扰性，传感器采用了滤光片作窗口。滤光片是在Si基片上镀多层膜制成的。每个物体都能发出红外辐射，其辐射峰值波长满足维恩位移定律 ($\lambda_m T = 2898$)。对于人体体温(约 36°C)，辐射的最长波长为 $\lambda_m = 2898 / 309 = 9.4 \mu\text{m}$ ，也就是说，**人体辐射在 $9.4 \mu\text{m}$ 处最强，红外滤光片选取了 $6.5 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段**，能有效地选取人体的红外辐射。红外滤光片透射曲线如上图所示。由图可见，小于 $6.0 \mu\text{m}$ 的光锐减至0， $6.5 \sim 15.0 \mu\text{m}$ 的辐射，其透射率达60%以上，因此，FT可以有效地防止、抑制电灯、太阳光的干扰，但对电灯发热引起的红外辐射光有时也能产生误动作。**热释电传感器常用于防盗报警、自动门、自动灯等。**

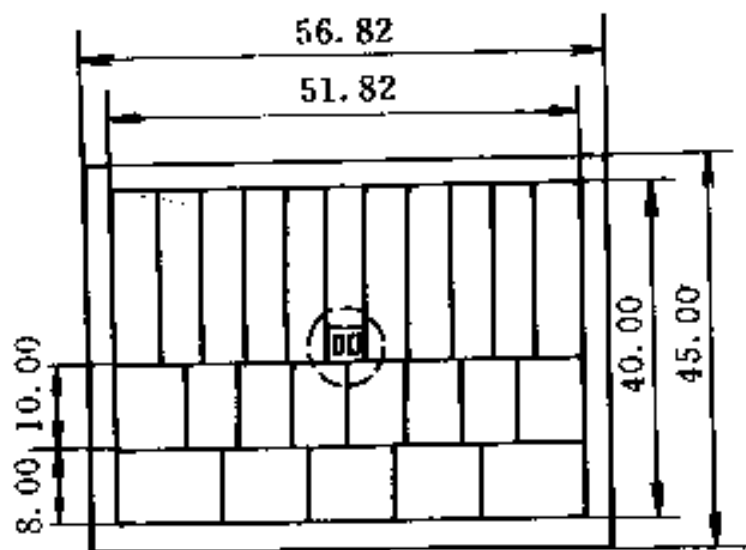
2. 热释电红外传感器的应用

(1) 人体探测 / 防盗报警器

① 菲涅尔透镜(FRESNEL LENS)

热释电传感器的前面要加菲涅尔透镜才能增加探测距离。

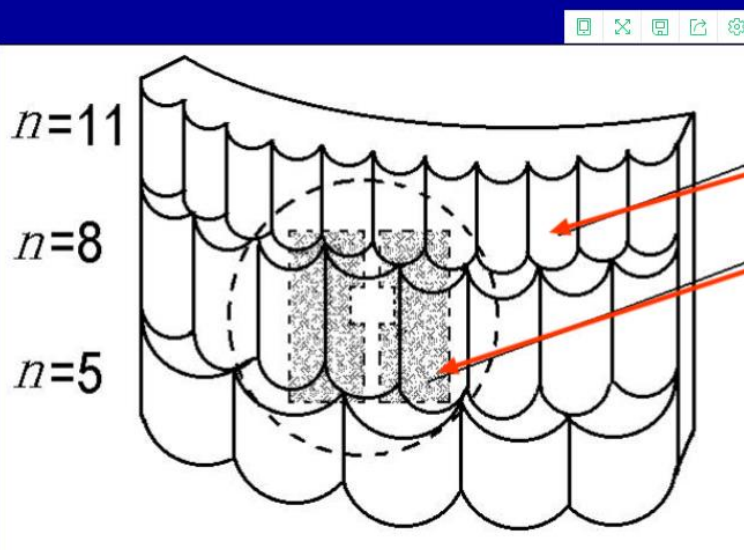
菲涅尔透镜是一种由塑料制成的特殊设计的透镜组，它上面的每个单元透镜一般都只有一个不大的视场，而相邻的两个单元透镜的视场既不连续，也不重叠，都相隔一个盲区。它的外型如下图所示。



菲涅尔透镜的外形

图 9.7.5 菲涅尔透镜的外形

菲涅尔透镜：

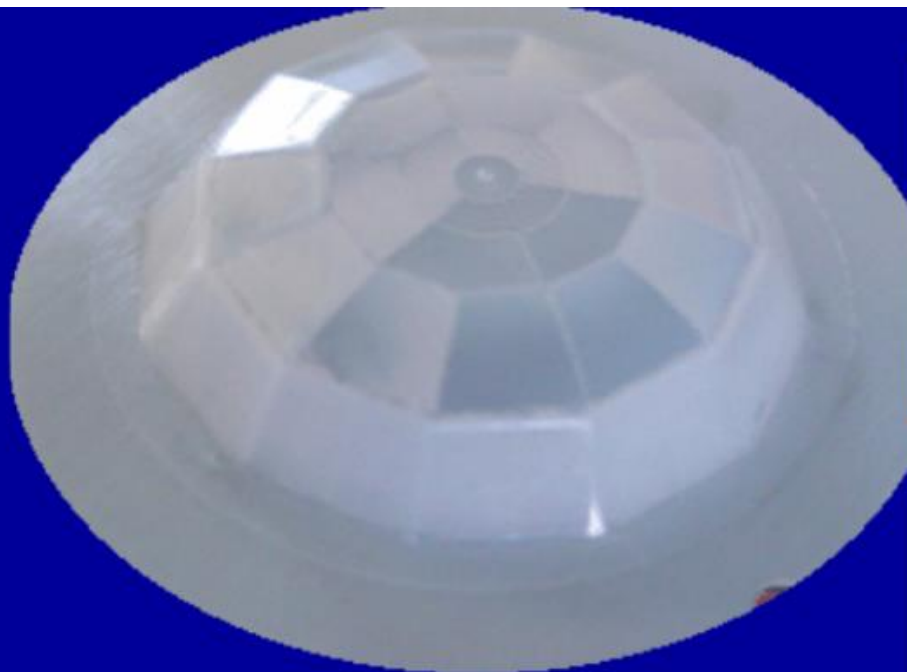


菲涅尔透镜

热释电晶片

菲涅尔透镜外形：

热释电传感器不加菲涅尔透镜时，探测距离小于2m；加上加菲涅尔透镜，探测距离可增加3倍以上。



下载该文档



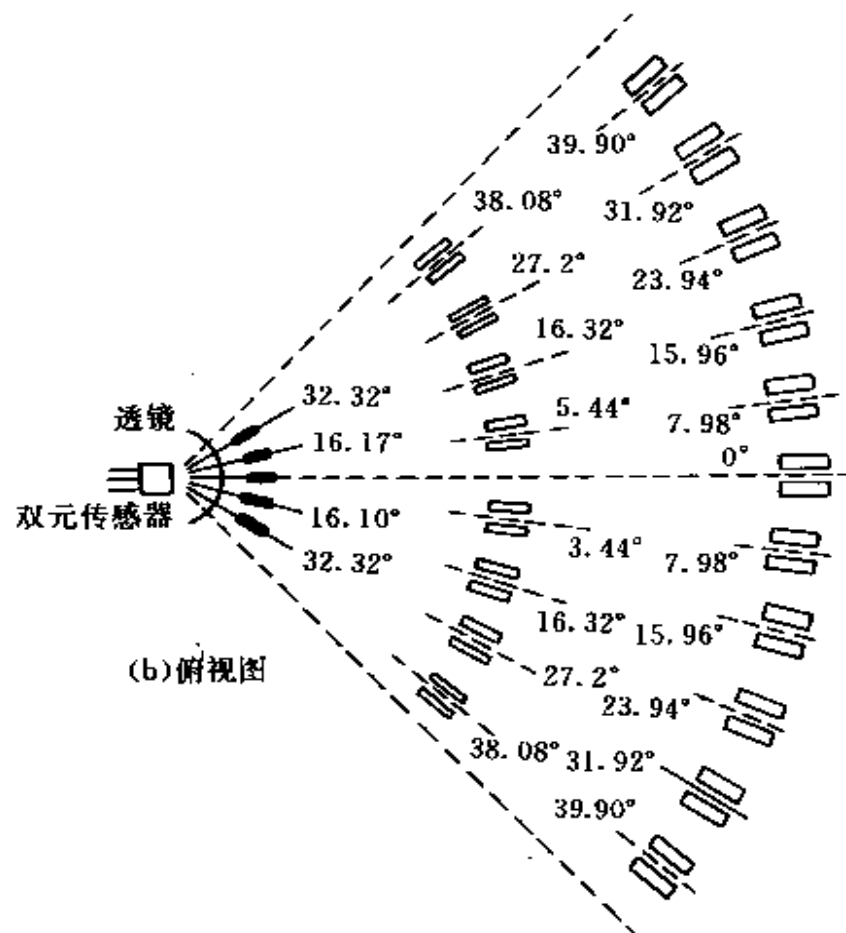
我是本文作者

预览反馈

原创作品 侵权必究

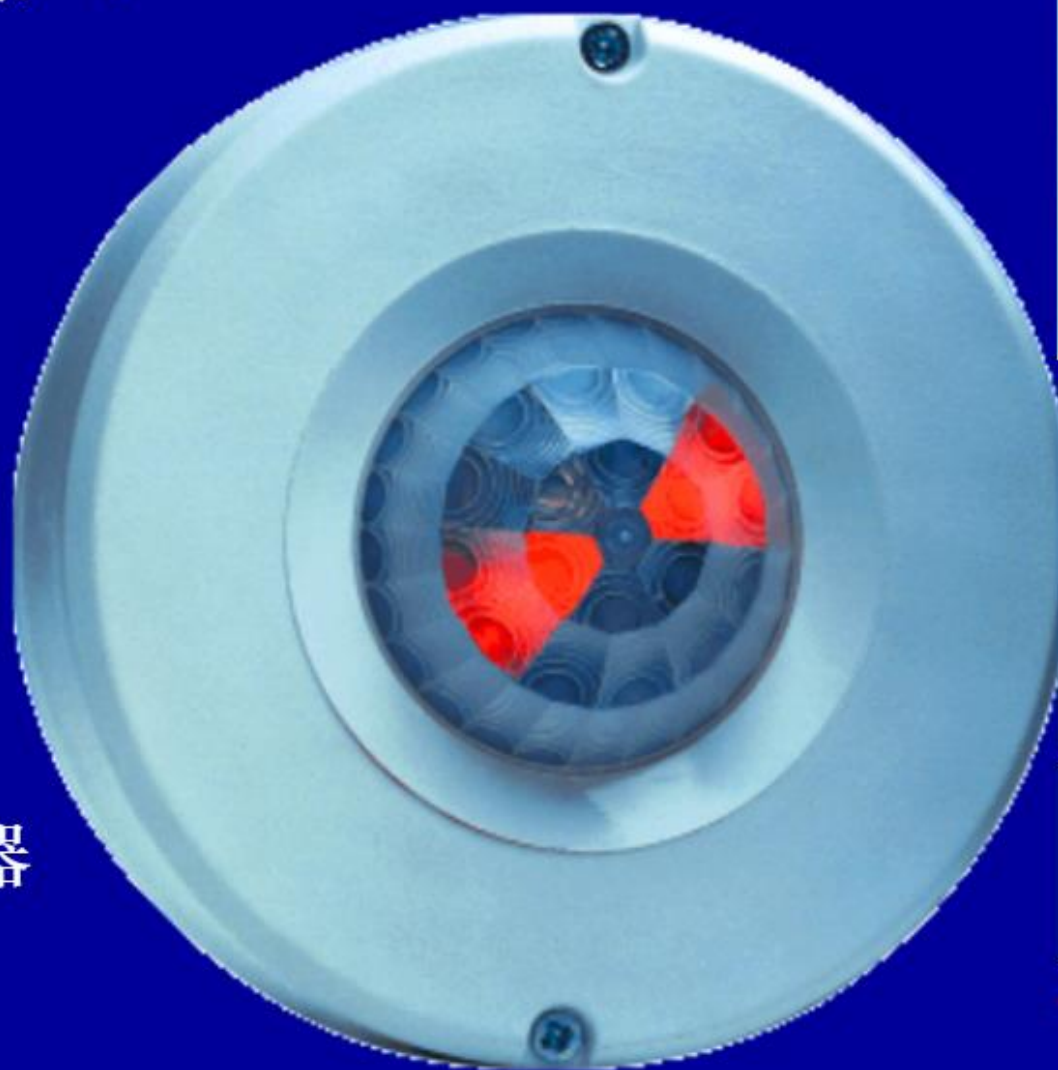
CE-024型菲涅尔透镜的视场的侧视图和俯视图如下图所示。当人体在这一监视范围内运动时，顺次地进入某一单元透镜的视场，又走出这一视场，热释电传感器对运动的人体一会儿看到，一会儿看不到，再过一会又看到，之后又看不到，于是人体的红外辐射不断地改变热释电的温度，使它输出一个又一个相应的信号。从图示的视场图可以看出，菲涅尔透镜是有防盗盲区的，安装在2m高处的菲涅尔透镜存在着小于1m的盲区，在图示的黑影之下。

不加菲涅尔透镜，探测距离仅为2m左右，加上菲涅尔透镜后，其探测距离可达10米，若采用双重反射型菲涅尔透镜，其探测距离可达20m以上。



菲涅尔透镜的视场

热释电报警器（续）：



吸顶式热释电报警器

热释电传感器应用：

①人体感应灯

②防盗报警

感应范围



人体感应灯:



第八章 CCD 图像传感器

图像传感器(Imaging Sensor ,缩写为IS, 又称成像器件、摄像器件)作为现代视觉信息获取的一种基础器件, 因其能实现信息的获取、转换和视觉功能的扩展(光谱拓宽、灵敏度范围扩大), 能给出直观、真实、层次最多、内容最丰富的可视图像信息, 所以在现代社会中得到了越来越广泛的应用。

图像传感器的功能是把光学图像转换为电信号, 即把入射到传感器光敏面上按空间分布的光强信息(可见光和非可见光)、转换为按时序串行输出的电信号 —— 视频信号, 而视频信号能再现入射的光辐射图像。把空间图像转换为按时序变化的电信号的过程称为扫描。

50年代前，电子束摄像管(如光导摄像管、飞点扫描管等)。60年代后期，MOS集成电路工艺成熟，各种固体图像传感器得到迅速发展，到70年代末期，已有一系列产品在军事、民用各方面得到广泛应用。

固体图像传感器(Solid State Imaging Sensor——缩写为SSIS)主要有三大类型、一种是电荷耦合器件(Charge Coupled Device简称CCD)；第二种是MOS图像传感器，又称自扫描光电二极管列阵(Self Scanned Photodiode Array，简称SSPA)，第三种是电荷注入器件(Charge Injection Device，简称CID)。目前，前两种用得比较多。

同电子束摄像管相比，固体图象传感器有以下显著优点：

(1)全固体化，体积很小，重量轻，工作电压和功耗都很低；耐冲击性好。可靠性高，寿命长。

(2)基本上不保留残象，无象元烧伤、扭曲，不受电磁干扰。

(3)红外敏感性。硅的SSPA光谱响应：0.20~1.0；CCD可作成红外敏感型；CID主要用于光谱响应大于3~5微米的红外敏感器件。

(4)象元尺寸的几何位置精度高(优于1微米)，因而可用于不接触精密尺寸测量系统。

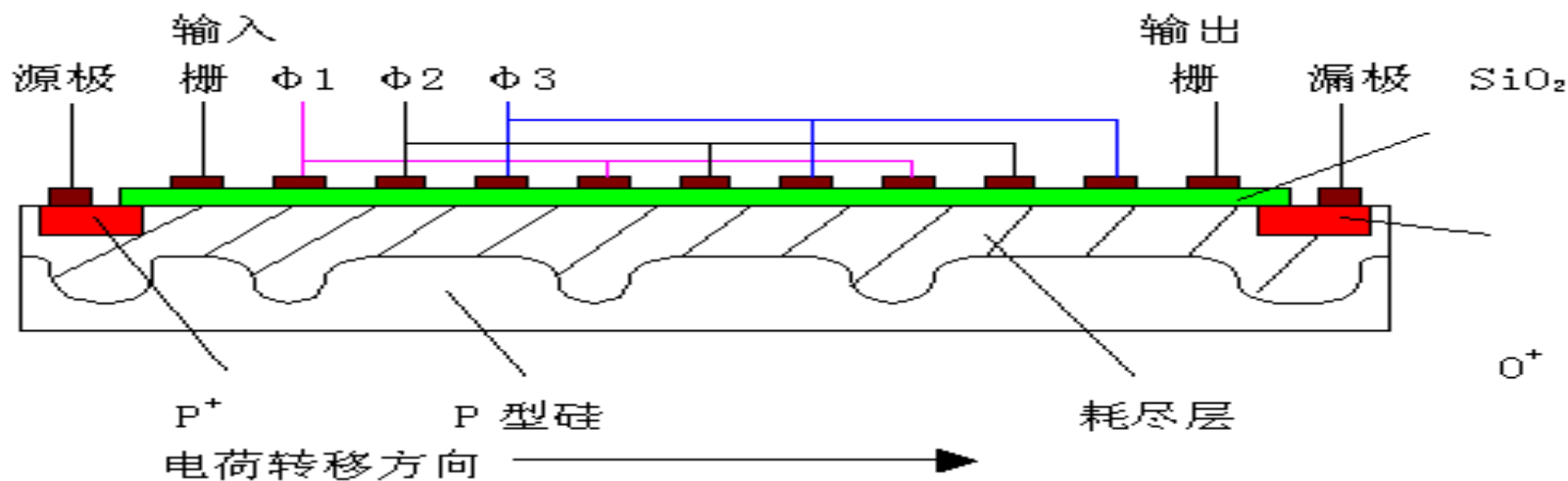
(5)视频信号与微机接口容易

主要应用领域：①小型化黑白/彩色TV摄像机；②传真通讯系统；③光学字符识别（OCR: Optical Character Recognition）；④工业检测与自动控制；⑤医疗仪器；⑥多光谱机载和星载遥感；⑦天文应用；⑧军事应用。

二、光固态图象传感器

光固态图象传感器由光敏元件阵列和电荷转移器件集合而成。它的核心是电荷转移器件CTD(Charge Transfer Device),最常用的是电荷耦合器件CCD(Charge Coupled Device)。CCD自1970年问世以后,由于它的低噪声等特点,CCD图象传感器广泛的被应用在微光电视摄像、信息存储和信息处理等方面。

1. CCD的结构和基本原理



CCD的MOS结构

基本功能：光电转换、电荷的存储和电荷的转移输出。

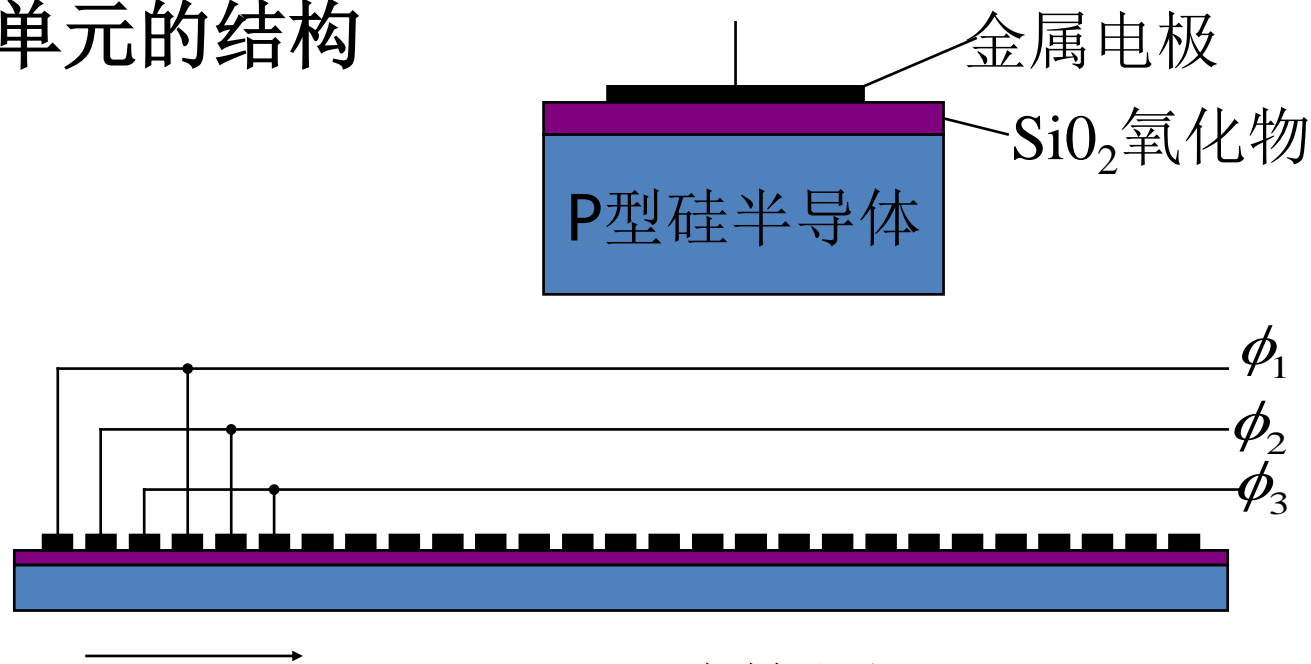


CCD传感器基本功能框图

应用：图像识别技术，固体摄像器件。

1、 电荷耦合器件的结构和工作原理

(1) 基本单元的结构



MOS结构图

CCD是由若干个电荷耦合单元组成，该单元的结构如图所示。CCD的最小单元是在P型（或N型）硅衬底上生长一层厚度约为120nm的SiO₂，再在SiO₂层上依次沉积铝电极而构成MOS的电容式转移器。将MOS阵列加上输入、输出端，便构成了CCD。

①势阱的产生

MOS的金属电极加正压，电极下的P型硅区域内空穴被赶尽，留下带负电荷的负离子，其中无导电的载流子，形成耗尽层。对带负电的电子来说，耗尽层是势能很低的区域，称为电子的“**势阱**”。

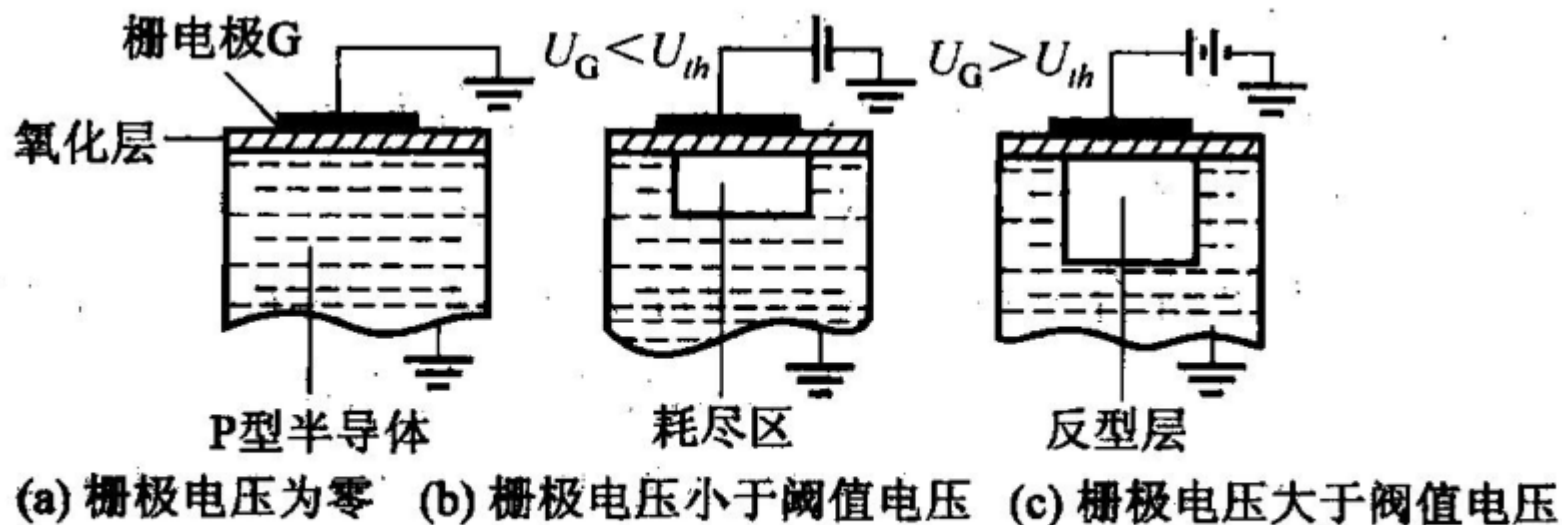
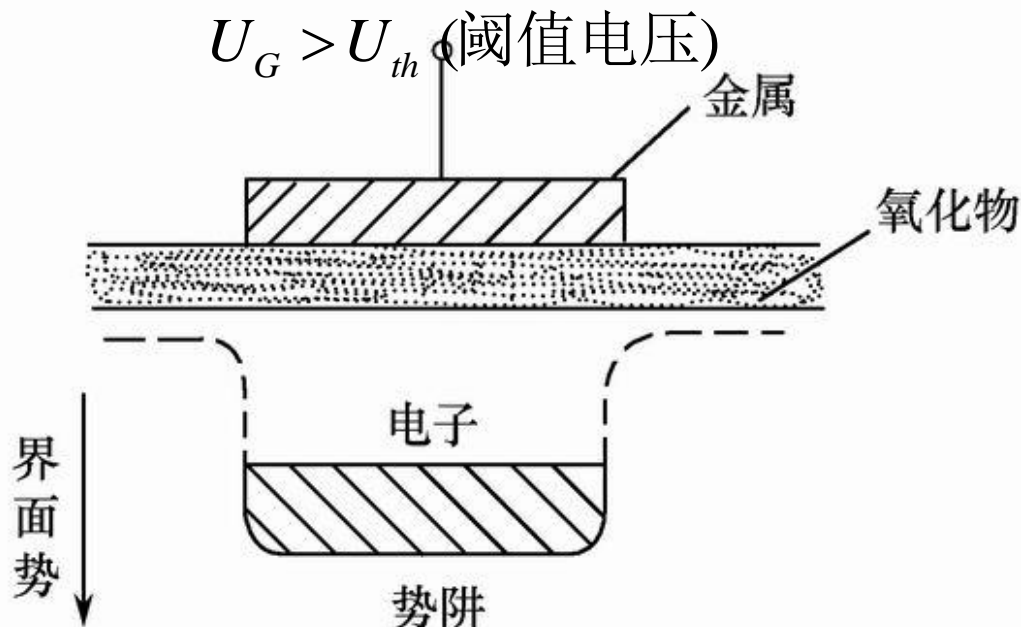


图 5-14 单个 CCD 栅极电压变化对耗尽区的影响

②电荷的存储

势阱的深浅取决于 U_G 的大小。

势阱的宽度取决于金属电极的宽度。



D_{OX} : 氧化层厚度

有信号电荷的势阱

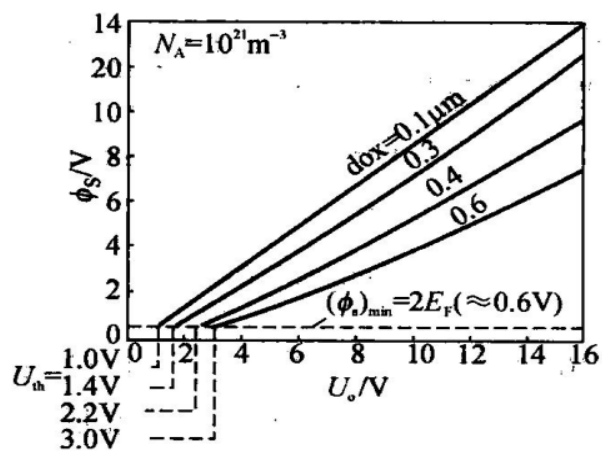


图 5-15 表面势 ϕ_s 与栅极电压 U_G 的关系 (P 型硅杂质浓度 $N_A = 10^{21} \text{ m}^{-3}$, 反型层电荷 $Q_{INV} = 0$)

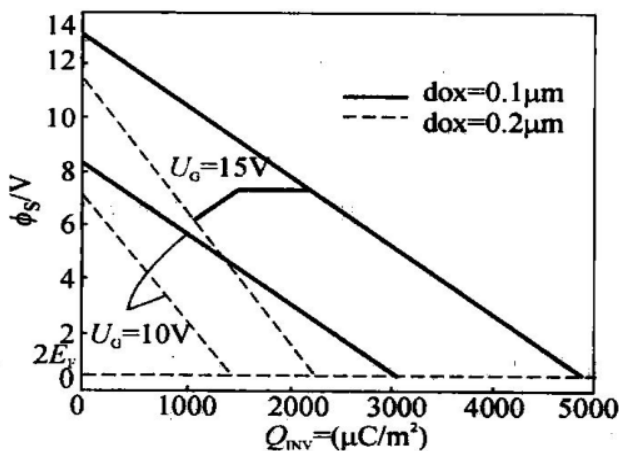
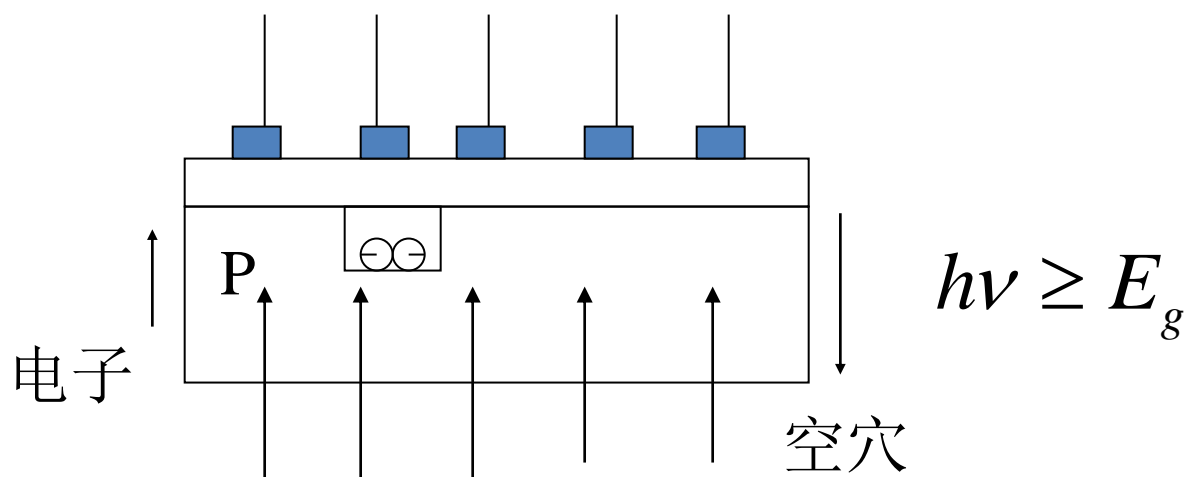


图 5-16 表面势 ϕ_s 与反型层电荷密度 Q_{INV} 的关系

光注入

光照射CCD后，激发的电子—空穴对，多数载流子注入P型硅衬底，少数载流子被收集存势阱中，形成“电荷包”，其大小与入射光信号大小成正比。



(a) 光注入

光注入电荷 Q_{IP} 为

$$Q_{IP} = \eta q \Delta n_{eo} A T_c$$

式中， η 为材料的量子效率， q 为电子电荷量， Δn_{eo} 为入射光的光子流速率， A 为光敏单元的受光面积， T_c 为光注入时间。

如何实现电荷定向转移呢？电荷转移的控制方法，非常类似于步进电机的步进控制方式。也有二相、三相等控制方式之分。下面以三相控制方式为例说明控制电荷定向转移的过程。

(3) 电荷的传输（耦合）

电荷从一个MOS元位置转移到另一个MOS元位置。

①三相CCD电极的结构

MOS上三个相邻电极，每隔两个所有电极接在一起。由3个相位差 120° 时钟脉冲驱动。

ϕ_1 驱动 (1,4,7) 在1、4、7 MOS单元下形成势阱。

ϕ_2 驱动 (2,5,8) 在2、5、8 MOS单元下形成势阱。

ϕ_3 驱动 (3,6,9) 在3、6、9 MOS单元下形成势阱。

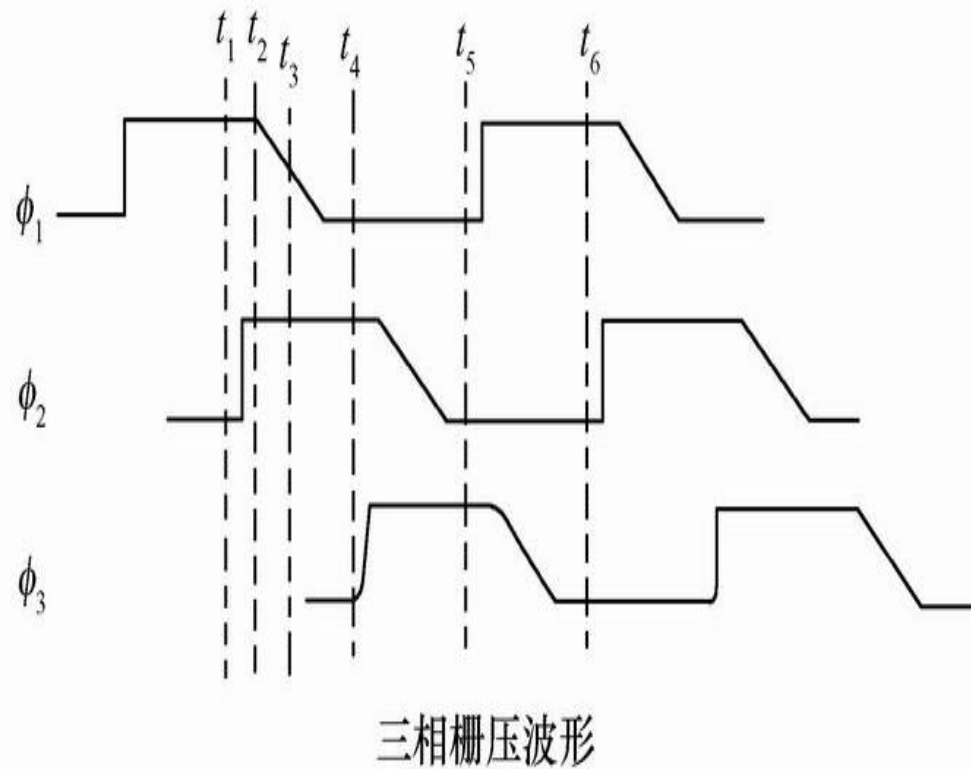
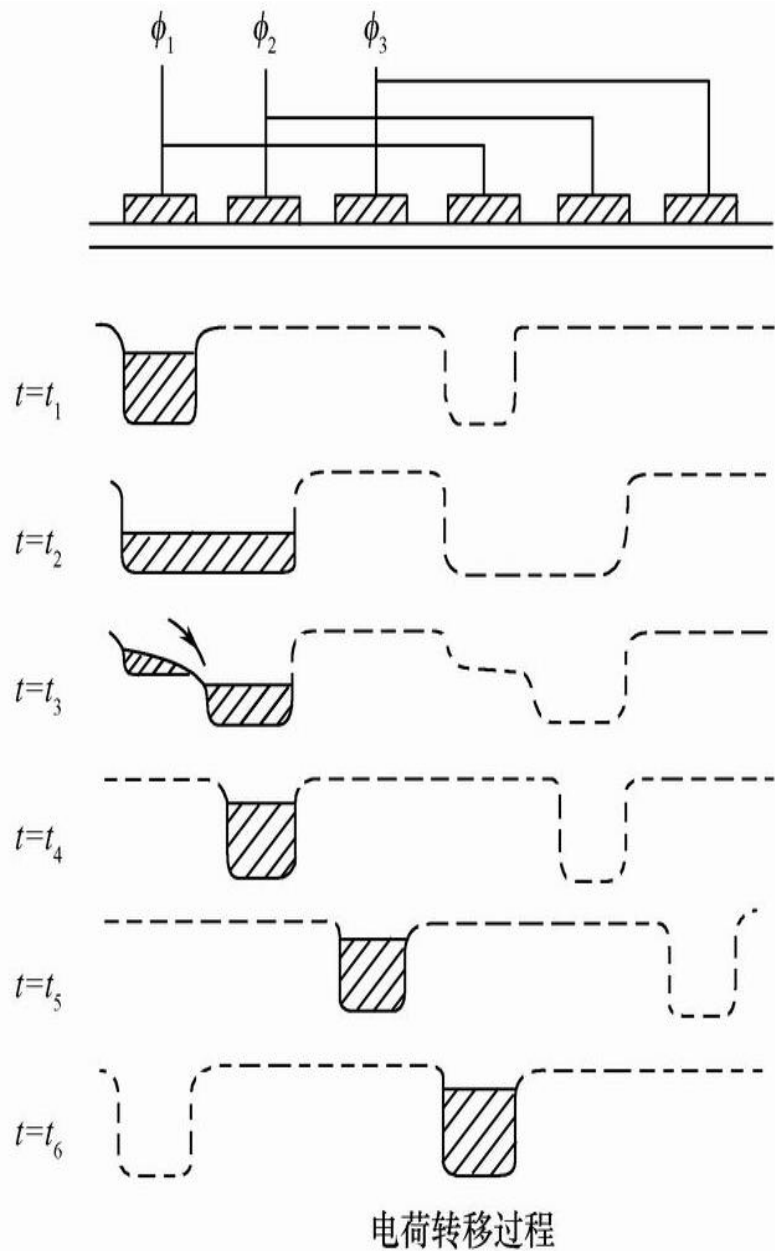
②电荷的定向转移

MOS电容器上的电压越高，势阱的深度越深；当外加电压一定时，势阱的深度随势阱中的电荷量的增加而线性减少。由此通过控制相邻MOS电容器栅极电压高低来调节势阱的深浅。

要求：

多个MOS单元紧密排列且势阱相互沟通。

金属电极上加电压脉冲严格满足相位要求。



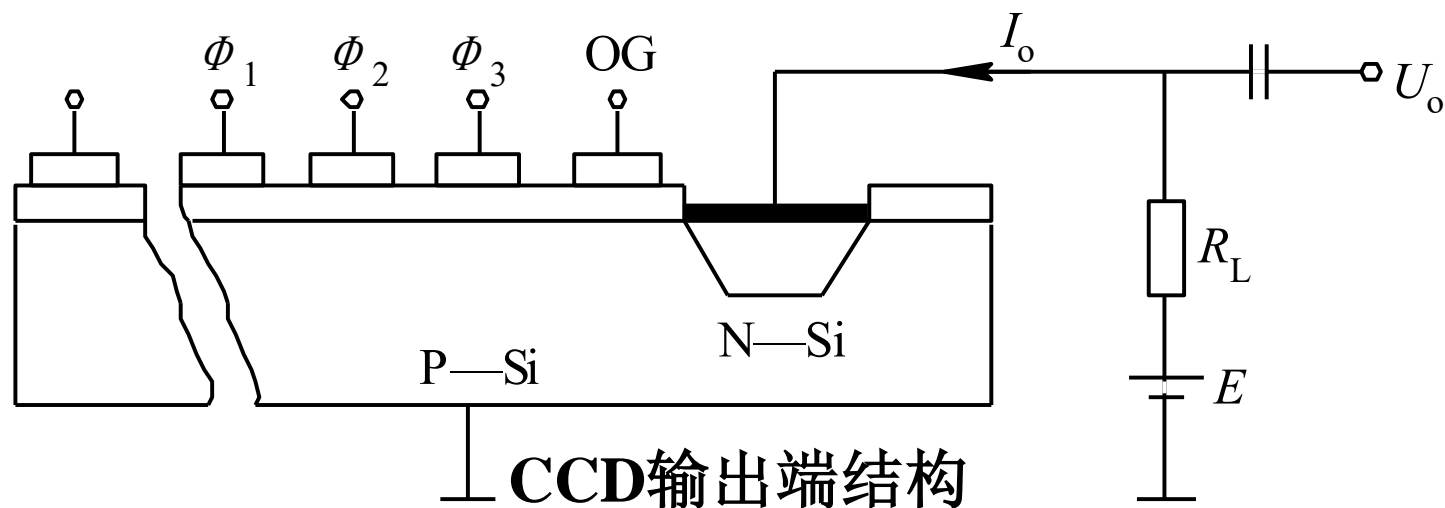
CCD 电荷转移

ϕ_1 驱动 (1,4,7) ϕ_2 驱动 (2,5,8) ϕ_3 (驱动3,6,9)

t_1 时刻, $\phi_1\phi_2\phi_3$ 为 (100),1组电极下形成深势阱, 势阱中存储电荷形成电荷包。

t_2 时刻至 t_3 时刻, ϕ_1 电压线性减小, ϕ_2 为高电平, 1组电极下的势阱变浅,2组电极下形成深势阱, 电荷从1组电极下逐渐转移到2组电极下。

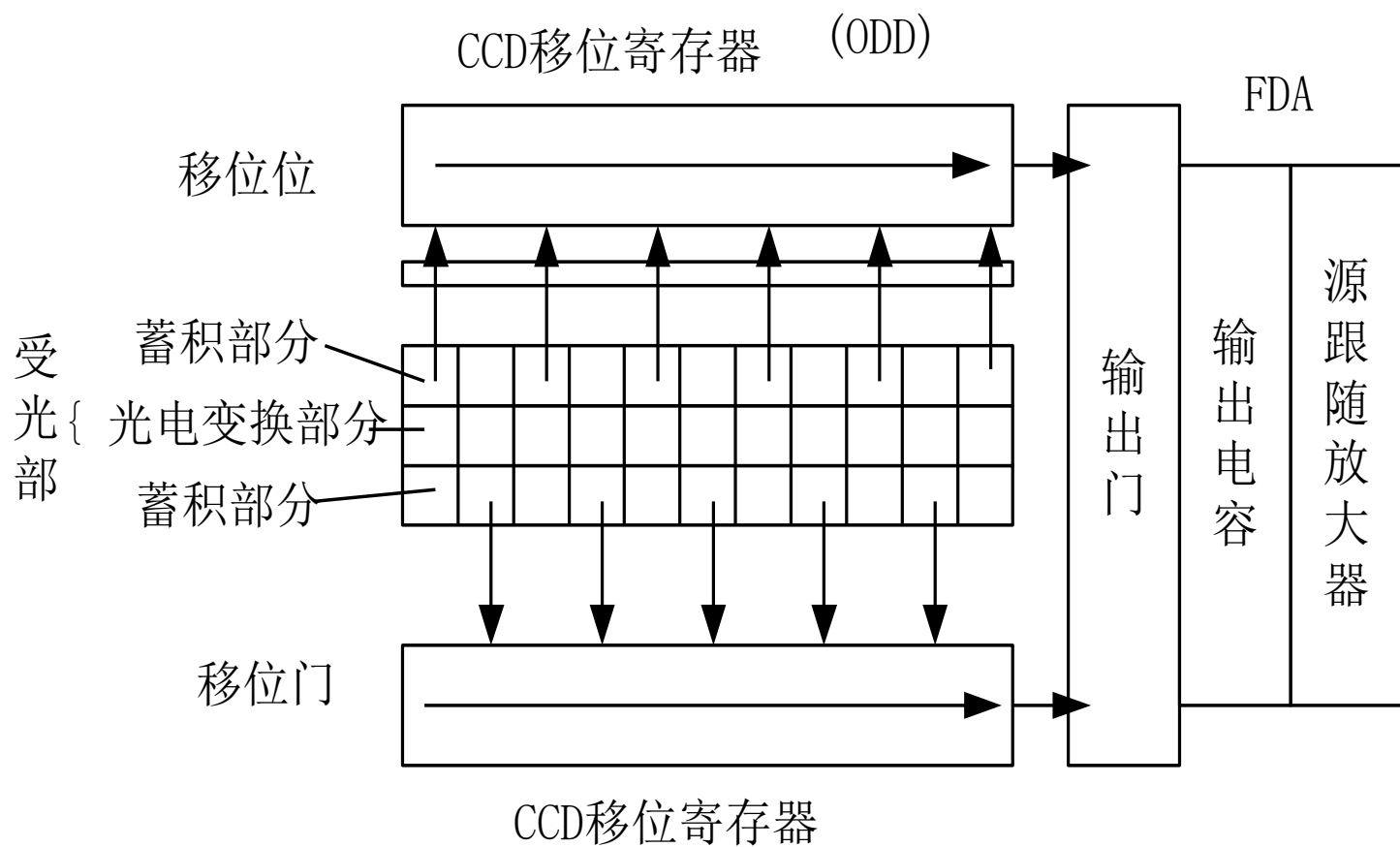
(4) 电荷的输出



在CCD阵列的末端衬底上制作一个输出二极管，当输出二极管加上反向偏压时，转移到终端的电荷在时钟脉冲作用下移向输出二极管，被二极管的PN结所收集，在负载 R_L 上就形成脉冲电流 I_o 。输出电流的大小与信号电荷大小成正比，并通过负载电阻 R_L 变为信号电压 U_o 输出。

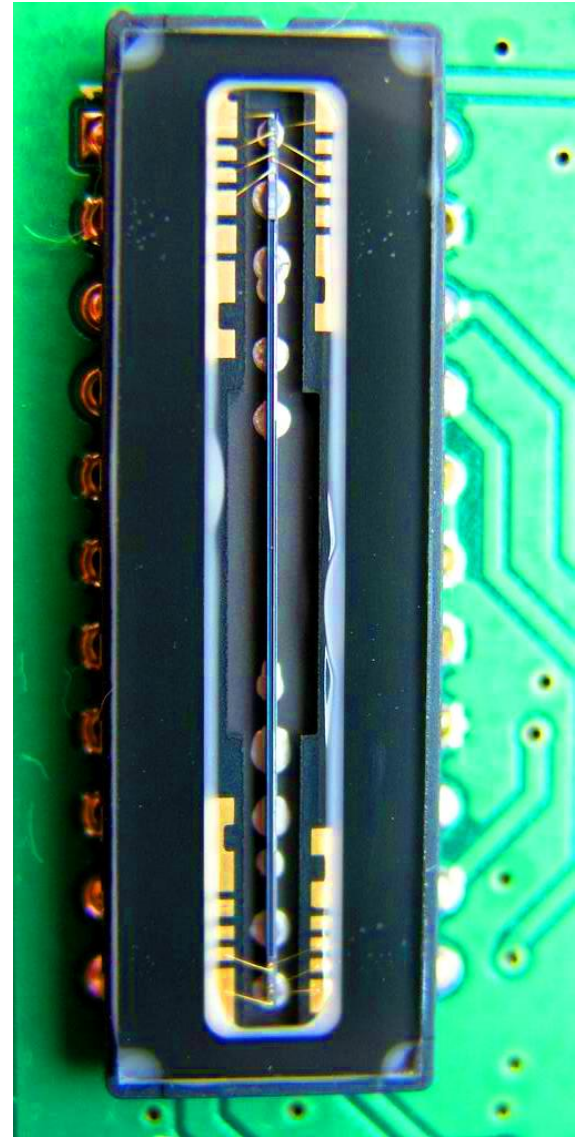
2、 CCD图像传感器

- 利用CCD的光电转移和电荷转移的双重功能，得到幅度与各光生电荷包成正比的电脉冲序列，从而将照射在CCD上的光学图像转移成了电信号“图像”。
- 由于CCD能实现低噪声的电荷转移，并且所有光生电荷都通过一个输出电路检测，且具有良好的的一致性，因此，对图像的传感具有优越的性能。
- 线列和面阵



线型固态图像传感器的基本构成

线阵CCD外形



作为成像器件，CCD的主要特性参数仍然是灵敏度、分辨力、光谱响应以及信噪比等。但CCD还起着电荷传输的作用，故还应包括转移效率、噪声、功耗等参数。

主要参数：

1 转移效率 η 和损耗率 ε

$$\eta = (Q(t)/Q(0)) \times 100\%$$

式中： $Q(0)$ 为 $t=0$ 时某电极下的电荷；

$Q(t)$ 为在时间 t 后转移到下一个势井中的电荷。

$$\varepsilon = 1 - \eta$$

如果CCD有 n 个栅电极，则总的转移效率为 η 的 n 次方。

2 时钟频率的上、下限

频率下限：CCD是一种非稳态器件，如果驱动脉冲电压变化太慢，则存储的电荷会受到干扰而不能准确测量。为了避免由于热产生的少数载流子对于注入信号的干扰，注入电荷从一个电极转移到下一个电极所用的时间 t ，必须小于少数载流子的平均寿命 τ ，即

$$t < \tau$$

在正常工作条件下，对于三相CCD， t 为

$$t = T/3 = 1/(3f) < \tau,$$

即

$$f_{\text{下}} > 1/(3\tau)$$

频率上限：由于CCD电极长度不是无限小，信号电荷通过电极需要一定时间。若要电荷有效转移，对三相CCD来说，必须使转移时间 $t \leq T/3$ 即

$$f_{\text{上}} \leq 1/(3t)$$

3 光谱特性和光电特性 略。

此外还有分辨率、暗电流和动态范围等。

CCD的特性参数

- 像素数量，CCD尺寸，最低照度，信噪比等
- 像素数是指CCD上感光元件的数量。44万（ $768*576$ ）、100万（ $1024*1024$ ）、200万（ $1600*1200$ ）、600万（ $2832*2128$ ）
- 信噪比：典型值为46分贝
- 感光范围 — 可见光、红外

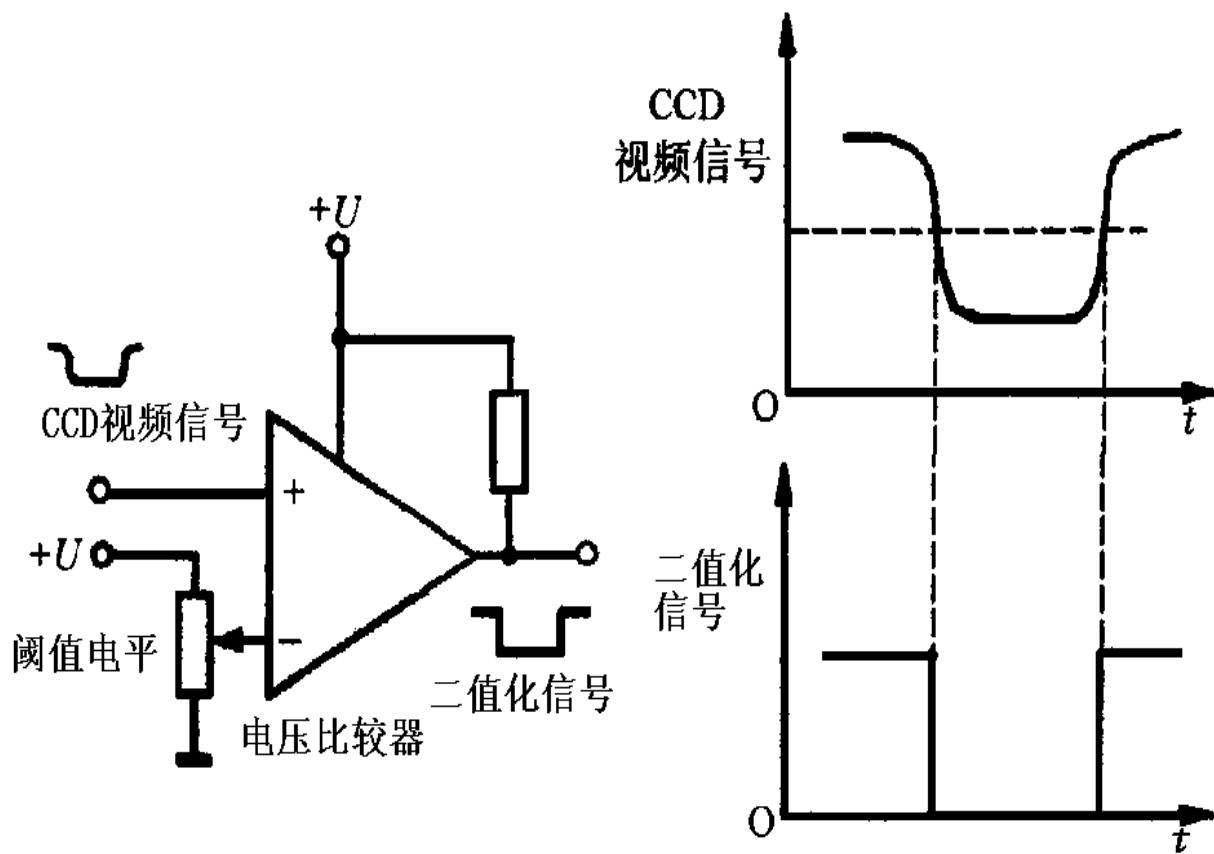
CCD的类型

- 线阵CCD：光敏元排列为一行的称为线阵，象元数从128位至5000位以至7000位不等，由于生产厂家象元数的不同，市场上有数十种型号的器件可供选用。
- 面阵CCD：器件象元排列为一平面，它包含若干行和列的结合。
- 目前达到实用阶段的象元数由25万至数百万个不等，按照片子的尺寸不同有1 / 3英寸、1 / 2英寸、2 / 3英寸以至1英寸之分。

5.2 CCD图像测量的二值化

CCD图像测量的基本原理是：光学系统把被测对象的光信息投射在**CCD**的光敏面元上，形成了光学图像。由**CCD**器件把光敏元上的光信息转换成与光强成比例的电荷量，积累起来的光电荷在一定频率的时钟脉冲的驱动下，在**CCD** 输出端得到被测对象的视频信号。

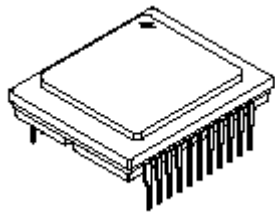
视频信号中每一个离散电压信号的大小对应着该光敏元所接收的光强强弱，而信号输出的时序则对应着**CCD**光敏元位置的顺序。通过后续处理线路对**CCD**输出的视频信号进行二值化或量化处理后，将被测对象从背景中分离出来，为下一步的数据处理做好准备。



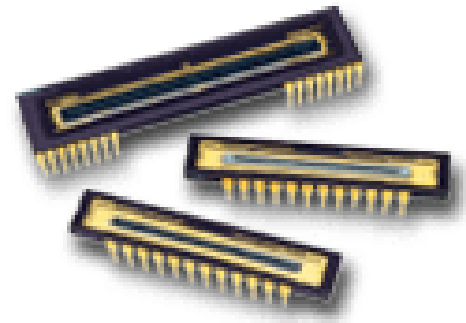
二值化处理电路

二值化处理是把图像和背景作为分离的二值图像对待。光学系统把被测对象成像在CCD光敏元上，由于被测对象与背景在光强上的强烈变化，反映在CCD视频信号中所对应的图像尺寸边界处会有急剧的电平变化，通过二值化处理把CCD视频信号中图像尺寸部分与背景部分分离成二值电平。实现CCD视频信号二值化的处理由硬件电路完成，常采用电压比较器，即将视频信号与某一电平阈值比较，视频信号电平高于阈值的部分输出高电平，而低于阈值部分输出低电平，形成具有一定宽度的二值化电平的脉冲信号，该脉冲宽度对应被测对象的图像尺寸大小，如上图所示。

线阵CCD：一行，扫描；体积小，价格低；
面阵CCD：整幅图像；直观；价格高，体积大；



面阵CCD芯片

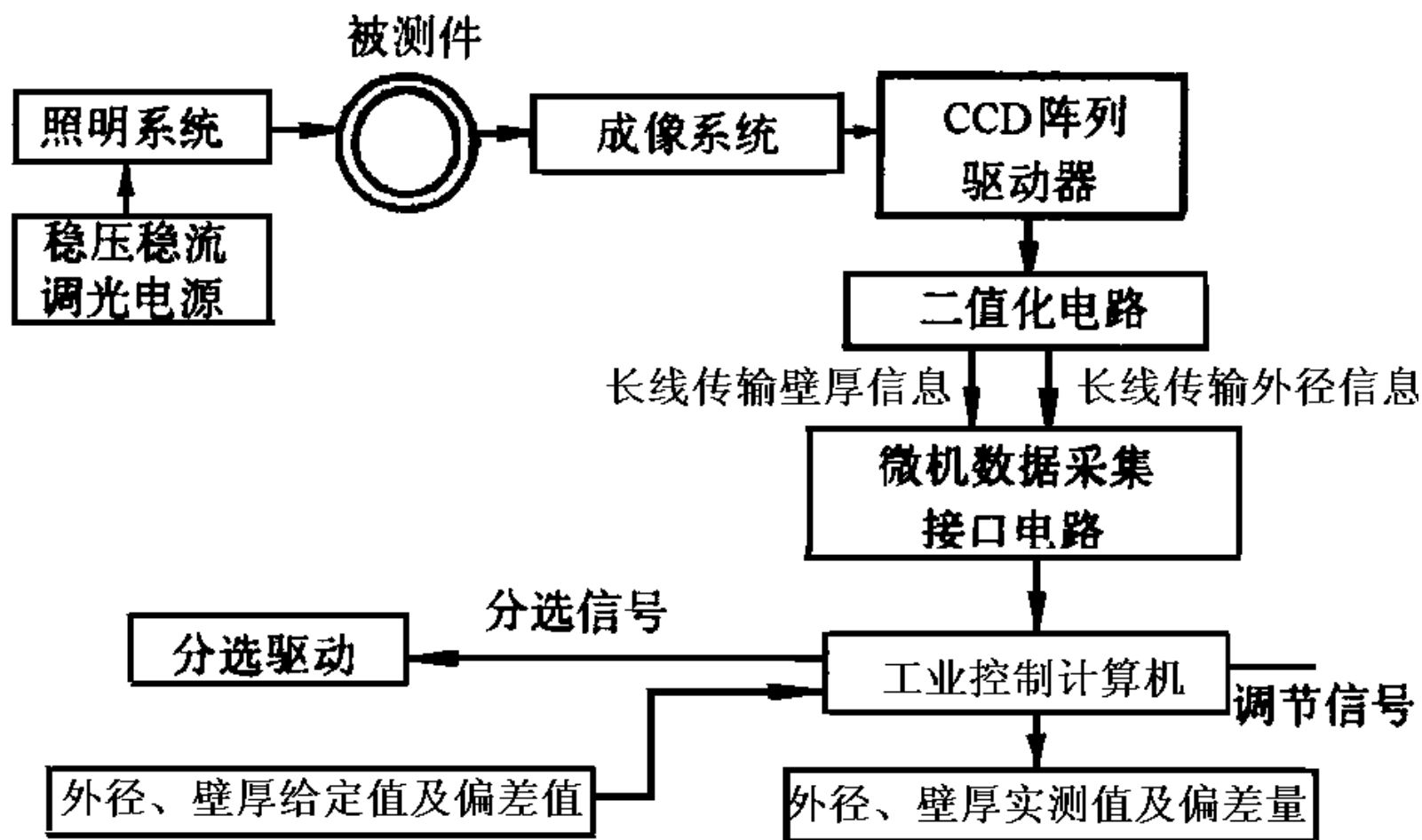


CCD在检测方面的应用

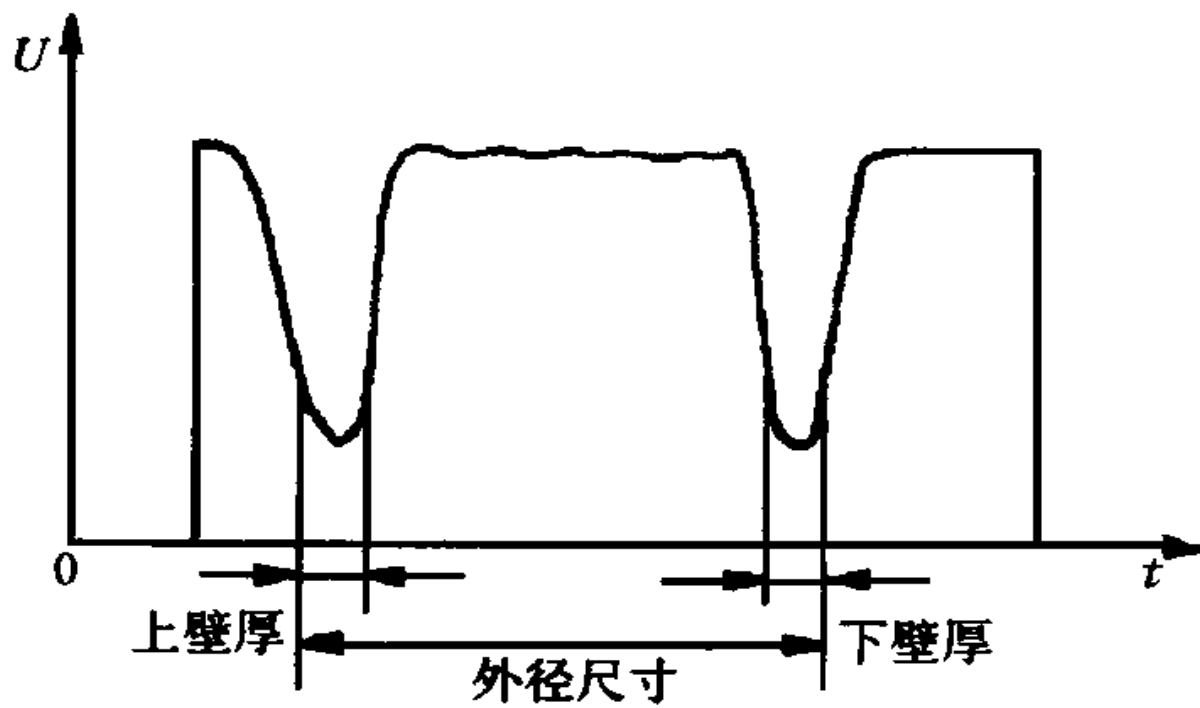
- 几何量测量
 - 测宽、测长、测径。
- 光谱测量
 - 光谱仪输出信号测量。

5.3 CCD玻管尺寸测控仪

CCD尺寸测量技术是一种非常有效的非接触检测方法，广泛应用于在线检测工件的尺寸。CCD玻管尺寸测控仪就是测量的一个应用实例，它对玻管外圆直径及壁厚尺寸进行实时监测，并根据测量结果对生产过程进行控制。光源照射被测玻管，经光学系统成像在CCD光敏阵列面上。由于各处透射率的不同，玻管的像在上下边缘处形成两条暗带，中间部分的透射光相对较强而形成亮带。两条暗带最外的边界距离是玻管外径成像的大小，中间亮带是玻管内径像的大小，暗带则是玻管壁厚像的大小，如图所示，CCD视频信号上出现了两个谷



系统结构框图



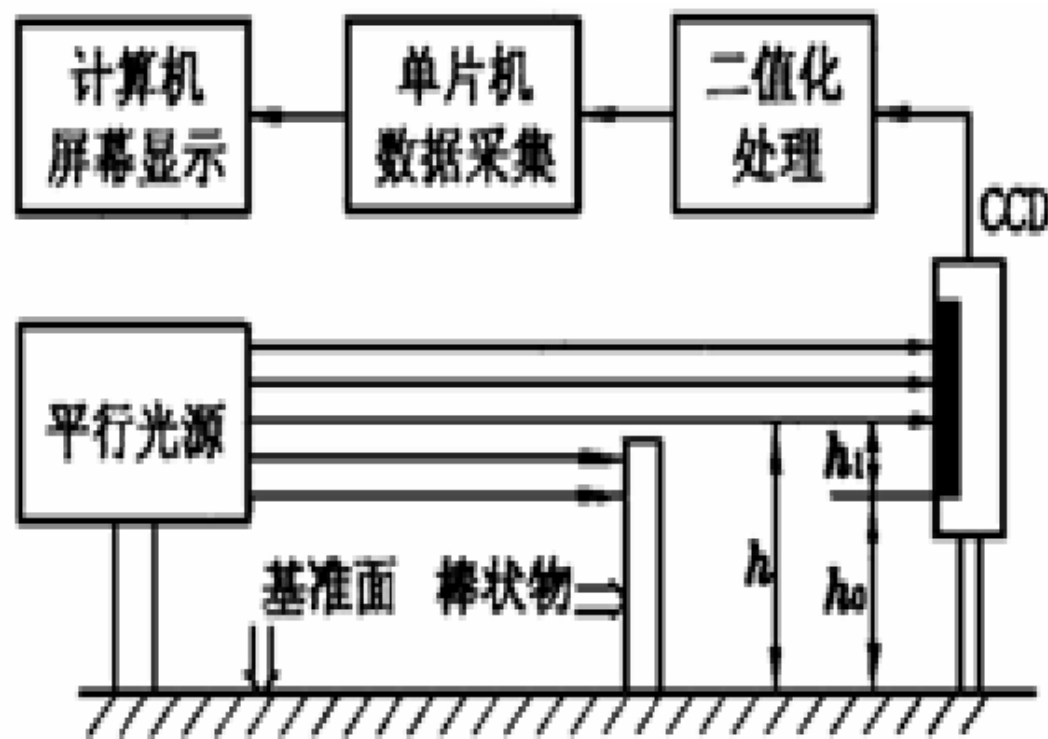
CCD视频信号

把视频信号中的外径尺寸部分和壁厚部分进行二值化处理，填入标准时钟脉冲，该时钟脉冲对应CCD空间分辨率，由计算机采集这两个尺寸对应的脉冲数，经数据处理后可得到被测玻管的尺寸。本系统被测玻管的直径尺寸为20mm，光学系统的放大率为0.8倍，则玻管像的大小为16mm，被测玻管的测量精度要求达到 $\pm 0.05\text{mm}$ ，他在像面上对应精度为 $\pm 0.04\text{mm}$ 。根据CCD测量灵敏度的要求，0.04mm要大于2个CCD像素的空间尺寸。选择TCD102C型号CCD可满足上述测量范围和精度的要求。该器件的技术指标为：

2048感光像素元，14微米相邻像素中心距，
工作时钟1MHz，两相驱动，
同步脉冲宽度128微秒，同步周期：7.5ms。

5.4 线阵CCD在线测量棒状物尺寸

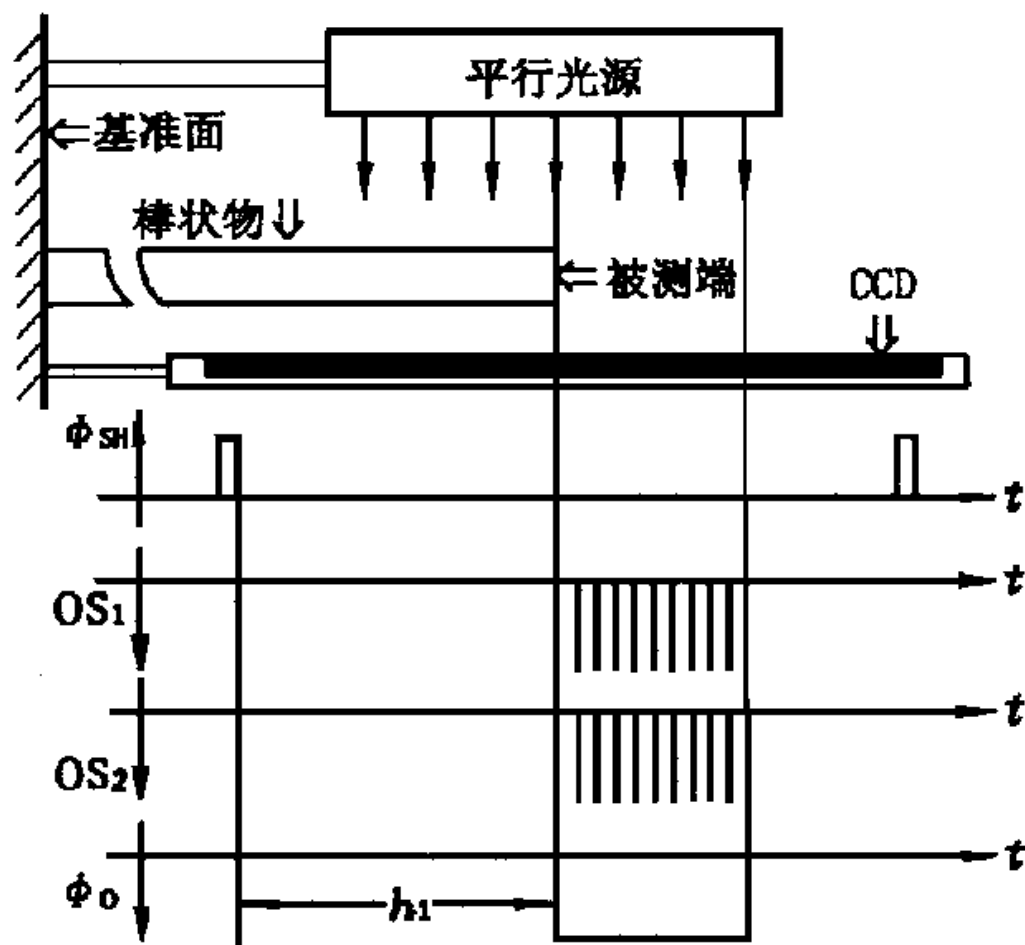
棒状物长度的非接触式精密在线测量，是采用平行光源对被测物垂直照射，形成被测物的轮廓图像并把它投影在CCD图像传感器上，轮廓图像转变成CCD图像传感器的输出信号，该信号经二值化处理后，再由单片机进行数据采集及信号处理，最后由计算机的屏幕显示出来。整个测量系统如图所示



5.4 线阵CCD在线测量棒状物尺寸

图中，平行光源、棒状物参比端及CCD图像传感器必须置于同一基准面上。棒状物被测端、平行光中心轴线和CCD的中心点要大致位于同一直线上。

平行光源的作用是产生一束高平行度的光线，以使棒状物经平行光垂直照射后在CCD上形成1:1的高精度像。



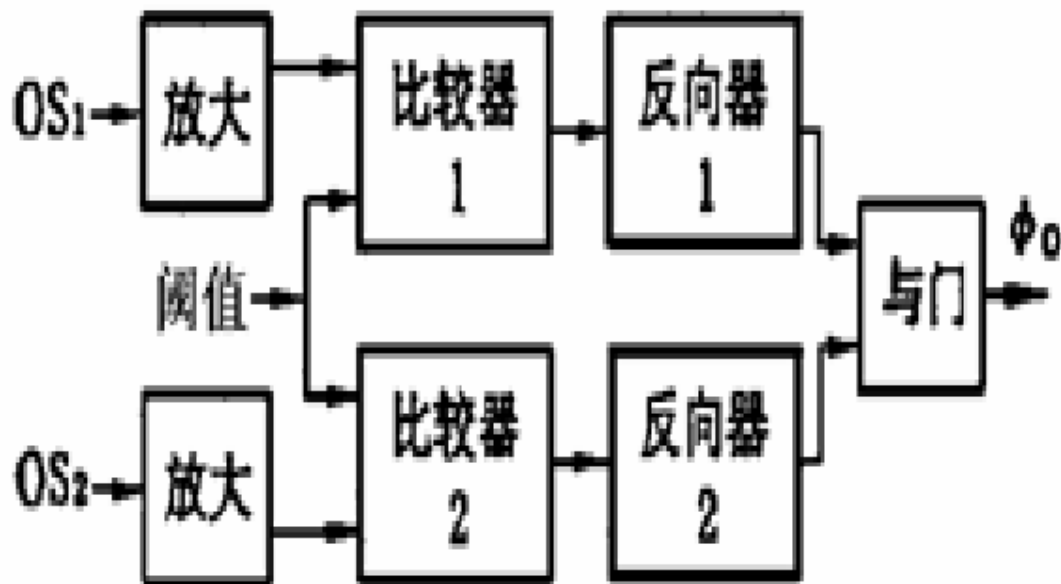
平行光源是本系统中的一个关键设备，它采用高亮度白炽灯作为光源，经组合透镜后形成平行光束，因而具有结构简便、平行度高及亮度均匀等特点。

本系统中使用的CCD型号为TCD141C，像点尺寸为 $7\mu\text{m}$ ，共5000个像点，测量长度范围为35mm。由平行光源、CCD图像传感器及棒状物构成的成像系统以及CCD视频输出信号的波形如上图所示。

图中，棒状物挡住了部分平行光，未被挡住的平行光照射在CCD上成像。 OS_1 和 OS_2 分别为CCD奇数位和偶数位像点的脉冲输出波形。奇、偶位像点脉冲有一个相位差。利用这个相位差可以很方便地对成像信号进行二值化处理。 Φ_{SH} 为周期扫描信号脉冲，利用 Φ_{SH} 可作为计数的定位脉冲。

5.4 线阵CCD在线测量棒状物尺寸

信号处理首先对CCD成像信号进行二值化处理。在光源照射下，CCD的成像电平在对应于棒状物被测端应有明显的电平变化，通过二值化处理可以把CCD视频信号中对应的图像尺寸边界分离出来，CCD视频信号二值化处理的硬件电路如图所示。



CCD 视频信号二值化处理电路框图

5.4 线阵CCD在线测量棒状物尺寸

CCD图像传感器的奇数位和偶数位输出的信号 OS_1 和 OS_2 经放大后和同一个阈值电平进行电压比较，根据这两路视频信号脉冲相位错叠的特点，通过逻辑电路合成一个方波 Φ_0 ，该方波的前沿代表棒状物被测端的位置(即图中的 h_1)。实践证明，我们只要选择合适的阈值，可以满足测量精度的要求。

单片机的功能主要有两个，一是完成棒状物参与成像的长度的定时计数功能，二是完成棒状物整个长度 $h=h_1+h_0$ 的数据转换，并送给计算机进行处理，其中 h_0 代表棒状物未参与成像的固定长度。

第9章 CMOS光电图像传感器

CMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor）图像传感器出现于1969年, 是一种用传统的芯片制造工艺将光敏阵列、放大器、A/D转换器、存储器、数字信号处理器和计算机接口电路等集成在一块硅片上制成器件, 它结构简单、处理功能多、成品率高, 价格低廉, 有着广阔的应用前景。

CMOS图像传感器主要由光电二极管、MOS场效应管、放大器与开关等电路构成。因此, 先学习MOS场效应管的基本原理。

9.1 MOS与CMOS场效应管

9.1.1 MOS场效应管的基本结构

MOS场效应管（MOSFET）是一种单极性半导体器件。由衬底、源极S、漏极D和栅极G组成。

结构如图9-1所示，用轻渗杂的P型硅为衬底，其上生成N+型源区S和N+型漏区D；

两个N+型区之间的部分称为沟道，沟道的长度为L，宽度为W；

称其为N沟道场效应管。

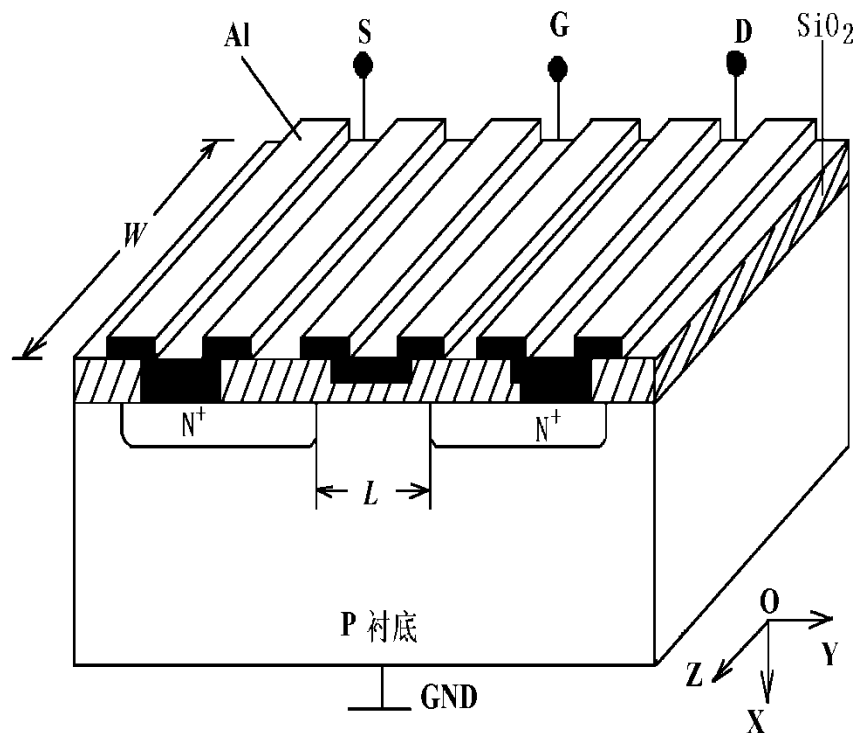


图9-1 MOS管的工艺结构

MOS场效应管的物理模型结构如图9-2所示，随着 U_g 的增高，反型层厚度增加，导电能力也增强。

栅极电压对源、漏电极间电流的控制能力，即MOS场效应管具有双极性晶体管基极电流控制集电极电流的特点。

场效应管中漏极电流被栅极电位 U_g 控制。

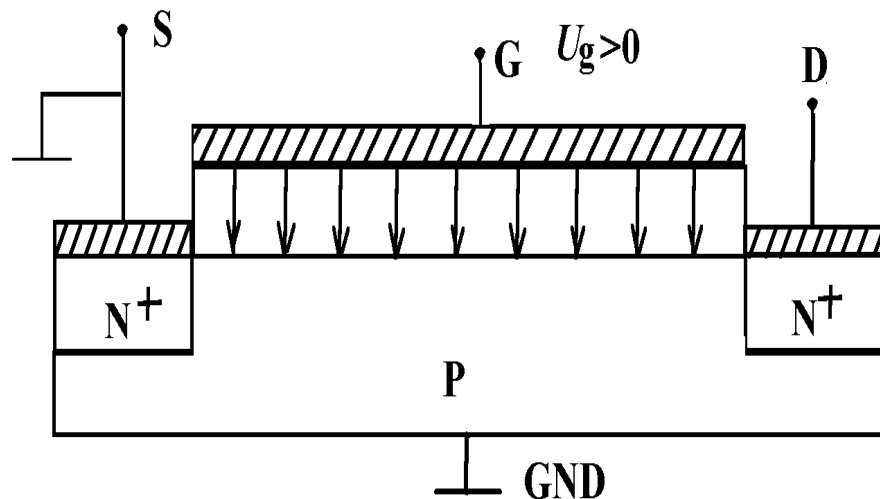
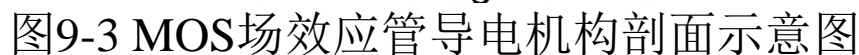


图9-2 MOS场效应管的结构

图9-3所示为MOS场效应管导电机构的立体剖面示意图，由图可以清楚地看出反型沟道层与耗尽层的分布情况。

再下一层是耗尽层，在两个N⁺区的下面也形成耗尽层，使它们彼此连接在一起，形成导电沟道。



9.1.2场效应管的主要性能参数

1. 阈值电压 U_{th}
 2. 伏安特性
 3. 频率特性
 4. 开关特性
 5. 噪声

MOS图像传感器SSPA

MOS 图像传感器 SSPA (self-scanned photodiode array) 是自扫描光电二极管列阵, 有的也把它称为 SSPD。一般把它与电荷注入器件 (CID)、电荷引动器件 (CPD)、电荷耦合器件 (CCD) 等一起统称为电荷传输器件或电荷转移器件。这类固体器件具有体积小、重量轻、灵敏度高、寿命长、低功耗、动态范围大等优点, 因而受到人们的重视。

一、SSPA 的结构与工作原理

$$U_{R_{\max}} = \frac{\bar{I}_p T_s}{C_d} = \frac{S_p \bar{E} T_s}{C_d}$$

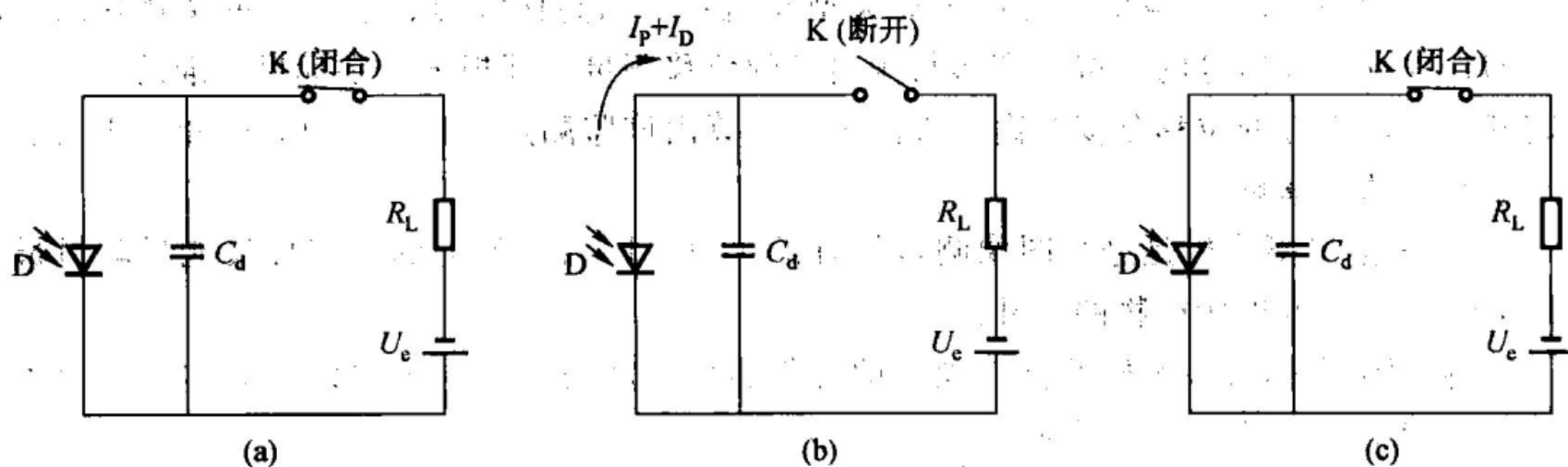


图 5-42 光电二极管电荷存储工作方式的原理图

MOS图像传感器SSPA

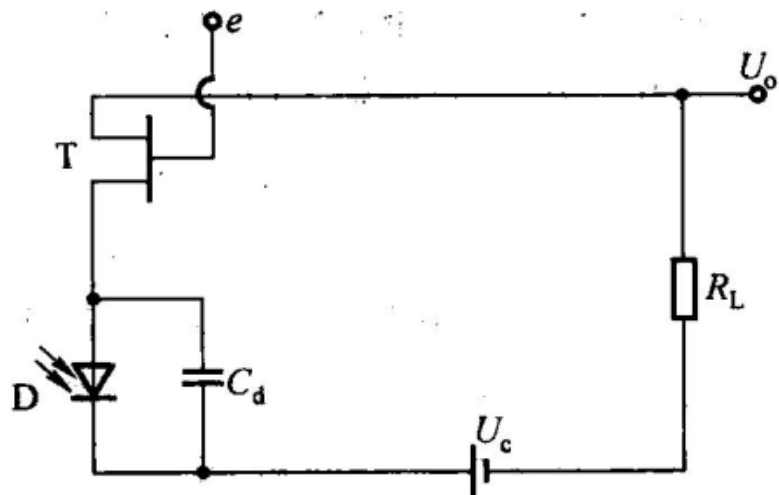


图 5-43 电荷存储光电二极管

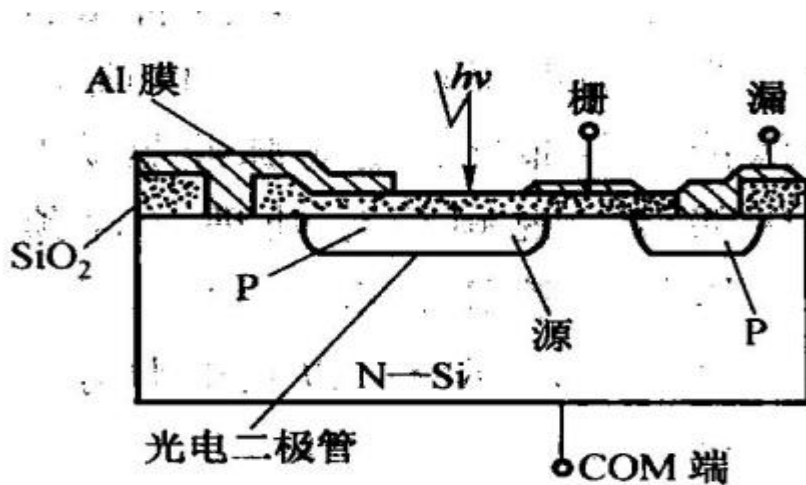


图 5-41 SSPA 内部单元结构图

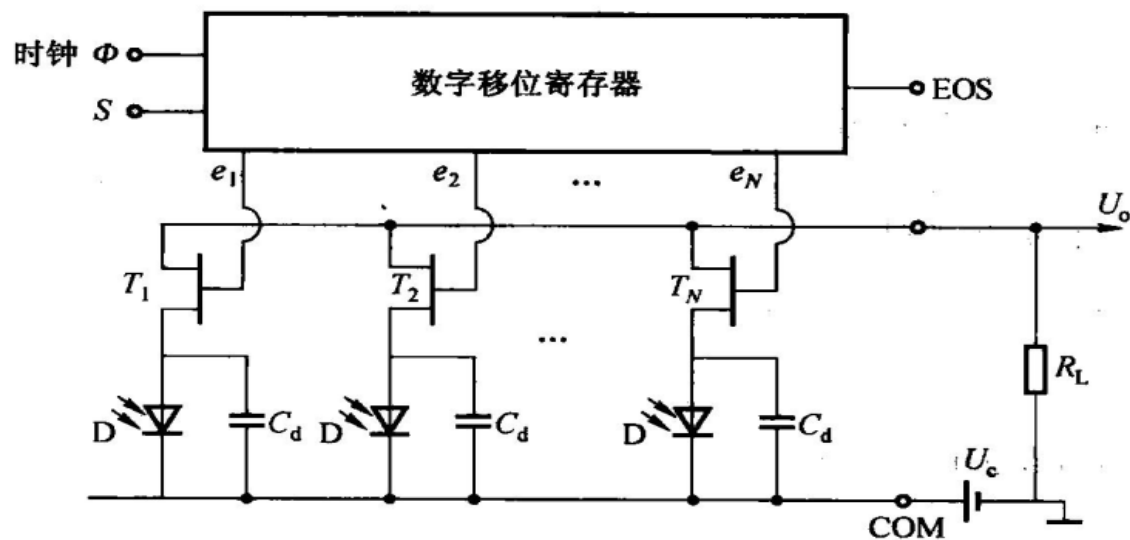


图 5-45 SSPA 线阵 (N 位) 电路原理图

CMOS图像传感器

目前，虽然市场上的 CCD 摄像机有技术成熟、噪声低、灵敏度与分辨率高等优点而应用非常广泛，但它表现有如下的缺点：（1）图像系统为多芯片系统，因为 CCD 的驱动电路和信号处理电路很难与 CCD 成像阵列单片集成；（2）需相对高的工作电压，因有二相或三、四相时钟脉冲；（3）兰光响应差，有光晕、图像的拖尾现象；（4）不能与亚微米和深亚微米的 VLSI 技术兼容，制作工艺特殊，因而成品率低，成本高；（5）电荷转移要求严格准确，以便获得信号的完整性；（6）图像信息只能按规定的程序自扫描输出，不能随机读取。因此，人们才研究、改进、发展了 CMOS 固体图像传感器。

CMOS (complementary Metal Oxide Semiconductor) 即互补金属氧化物半导体，它开始是计算机系统内的一种重要芯片。后来有人发现，将 CMOS 与光电二极管加工一起，也可以作成一种感光的图像传感器，尤其 CMOS 有制作工艺简单、又便于大规模生产和成本低廉等特性，这大大吸引着商家，因而投资研发出来。

与 CCD 相比，CMOS 图像传感器最明显的优势是器件结构简单、集成度高、功耗小、生产成品率高、成本低、容易与其他芯片整合。如可以将模数转换、控制芯片等集成在一起，使图像数据不必在迷宫般的电路中被传来送去，因而极大地提高了捕获速度。此外，CMOS 的功耗仅相当于 CCD 功耗的 $1/8 \sim 1/10$ ，可以制造出微型化、智能化成像产品，从而可开拓许多新的应用领域。下面就介绍 CMOS 摄像器件及 CMOS 摄像机。

CMOS图像传感器

1. CMOS 图像传感器的像素单元结构及原理

CMOS 图像传感器的最基本的像素单元结构，是在 MOS 场效应管的基础上加上光电二极管构成。说得详细一点就是以一块杂质浓度较低的 P 型硅片作衬底，用扩散的方法在其表面制作两个高掺杂的 N^+ 型区作为电极，即场效应管的源极和漏极，再在硅的表面用高温氧化的方法覆盖一层二氧化硅 (SiO_2) 的绝缘层，并在源极和漏极之间的绝缘层的上方蒸镀一层金属铝，作为场效应管的栅极。最后，在金属铝的上方放置一个光电二极管，这就构成了最基本的 CMOS 图像传感器。

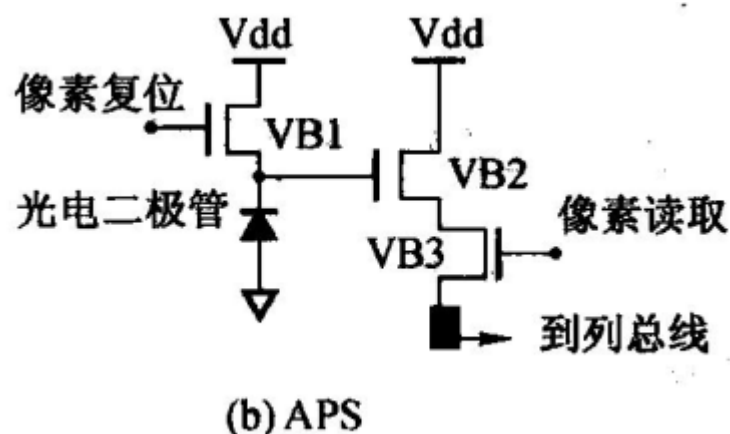


图 5-51 有源像素单元时序图