

闯红灯触发抓拍的原理

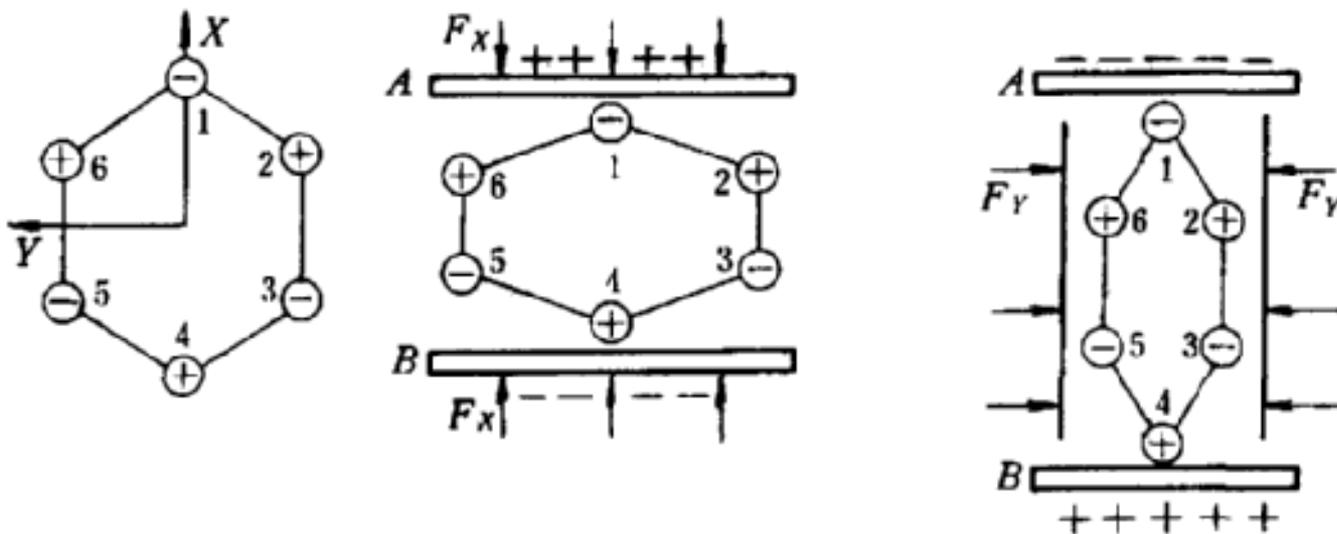




课题二 压电式传感器测力

引言

- 压电式传感器的工作原理是基于某些介质材料的压电效应，是典型的有源传感器。当材料受力作用而变形时，其表面会有电荷产生，从而实现非电量测量。



引言

- 压电式传感器具有体积小，重量轻，工作频带宽等特点，因此在各种**动态力**、机械冲击与振动的测量，以及声学、医学、力学、宇航等方面都得到了非常广泛的应用。



6166型



6174型



6152 型



6161型

加速度传感器



测振表

内容简介

- 压电效应及压电材料
- 压电式传感器测量电路
- 压电式传感器的应用

课题二 压电式传感器测力

知识目标：

- (1) 了解压电材料、熟悉压电效应；
- (2) 了解压电式传感器的测力转换电路；
- (3) 理解和掌握压电式传感器的工作原理。

能力目标：

掌握压电式传感器的类型、结构及应用；
了解闯红灯触发抓拍的原理。

课题二 压电式传感器测力

重点：

理解和掌握压电式传感器的工作原理及应用。

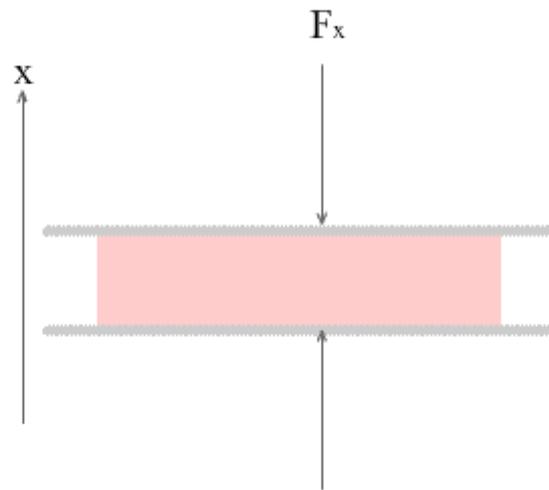
难点：

(1) 测力转换电路。

一、基础知识

1、压电效应

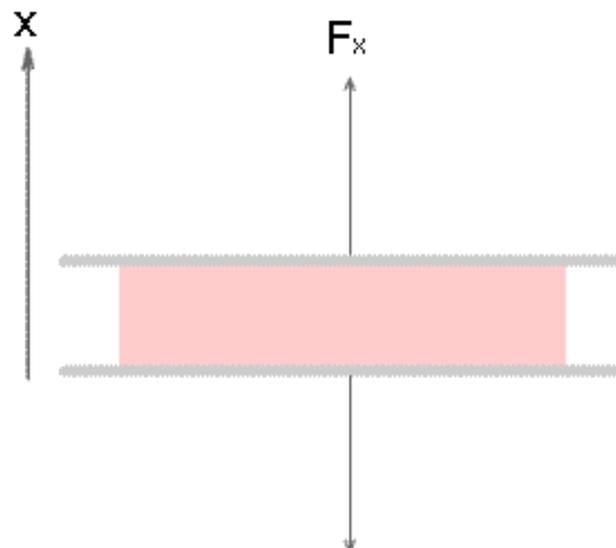
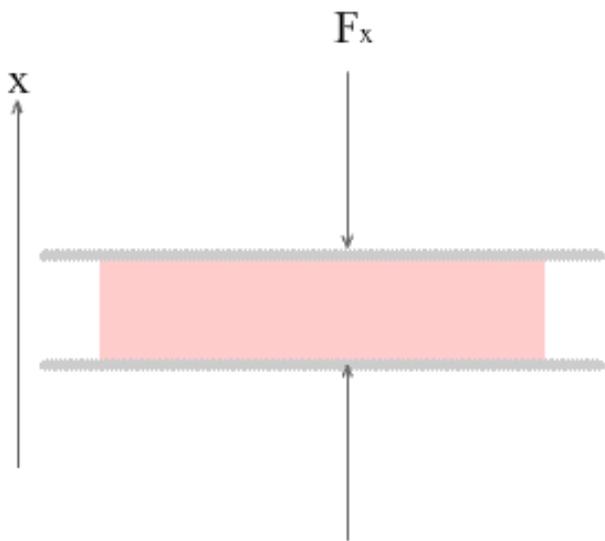
某些物质（物体），如石英、铁酸钡等，当受到外力作用时，不仅几何尺寸会发生变化，而且内部也会被极化，表面会产生电荷；当外力去掉时，又重新恢复到原来不带电的状态，这种现象称为压电效应。



压电效应示意图

1、压电效应

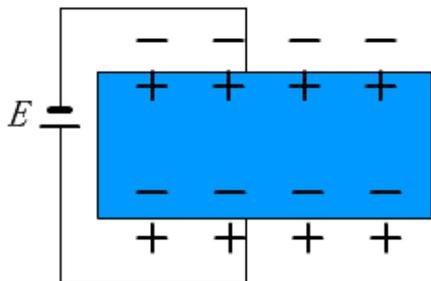
当作用力方向改变时，电荷的极性也随着改变。



2、逆压电效应

相反，如果将这些物质（物体）置于电场中，其几何尺寸也会发生变化，这种由外电场作用导致物质（物体）产生机械变形的现象，称为逆压电效应（电致伸缩效应）。

加正向电压



加反向电压

逆压电效应



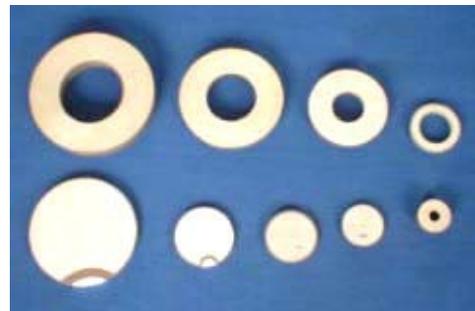
压电效应的可逆性

3、压电材料

- 具有压电效应的物质很多，如
 - (1) 石英晶体
 - (2) 压电陶瓷
 - (3) 高分子压电材料等。



天然形成的石英晶体外形



压电陶瓷



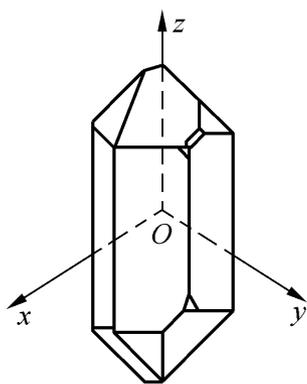
高分子压电材料

天然形成的石英晶体外形

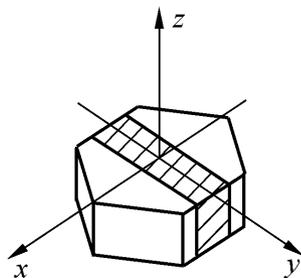


3.1 石英晶体

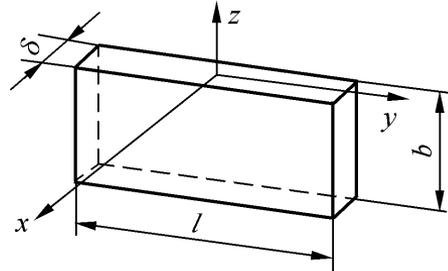
- 石英晶体是一种应用广泛的压电晶体。它是二氧化硅单晶体，属于六角晶系。它为规则的六角棱柱体。石英晶体有 3 个晶轴： x 轴、 y 轴和 z 轴。



(a) 完整的石英晶体



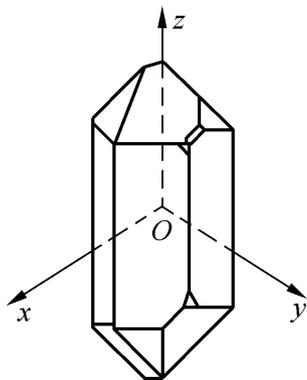
(b) 石英晶片的切割



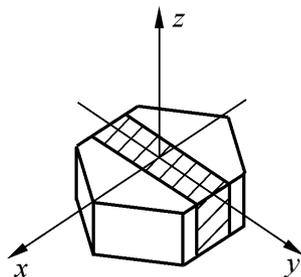
(c) 石英晶片

3.1 石英晶体

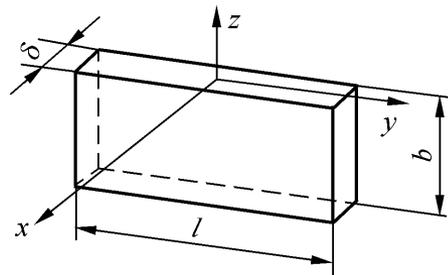
- z 轴又称光轴，它与晶体的纵轴线方向一致； x 轴又称电轴，它通过六面体相对的两条棱线并垂直于光轴； y 轴又称为机械轴，它垂直于两个相对的晶柱棱面，它的电场致伸缩效应最明显。



(a) 完整的石英晶体



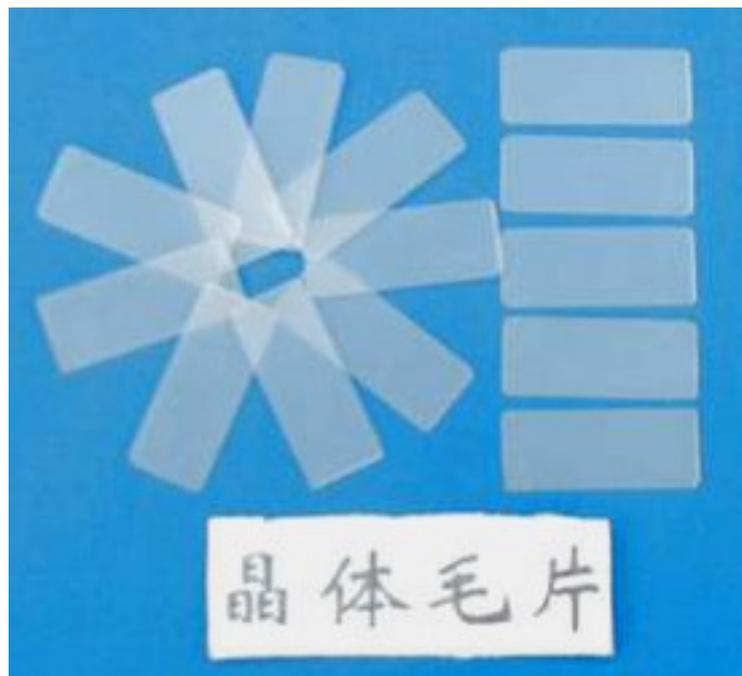
(b) 石英晶片的切割



(c) 石英晶片

石英晶体切片及封装

石英晶体薄片

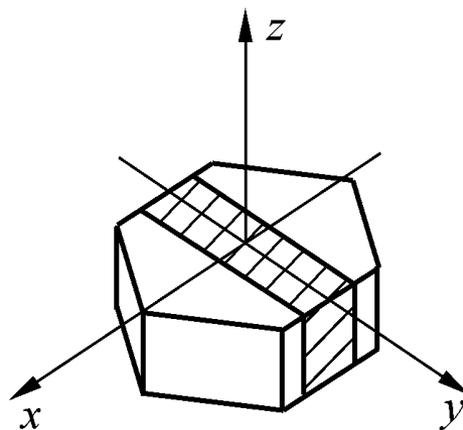
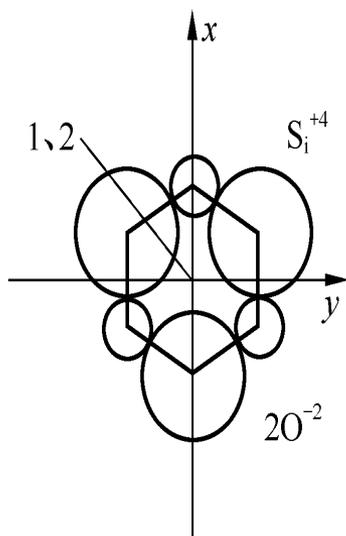


双面镀银并封装

石英晶体的压电效应机理

- 沿光轴看去，石英晶体可以等效地认为是正六边形排列结构。

1— 正电荷等效中心
2— 负电荷等效中心

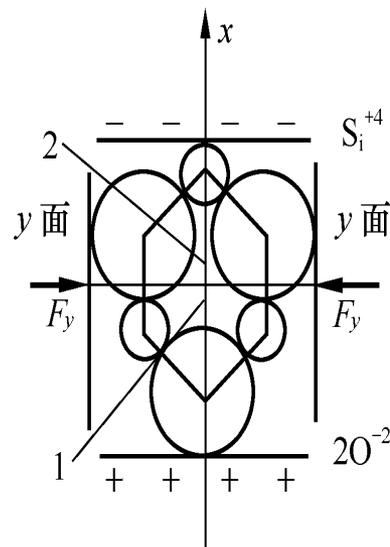
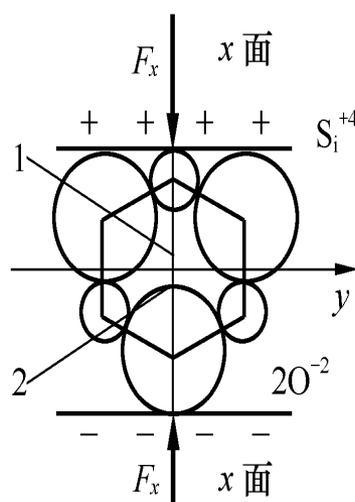
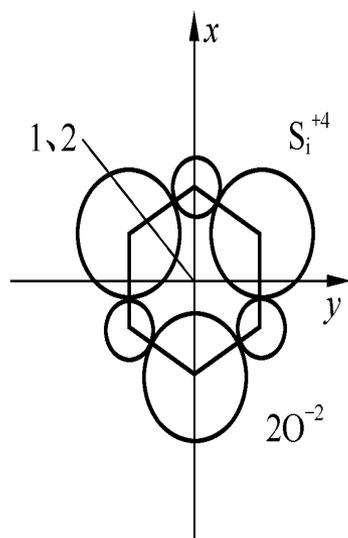


(a) 未受力的石英晶体

石英晶体的压电效应机理

- 石英晶体为 SiO_2 ，它的每个晶胞中有 3 个硅离子和 6 个氧离子，一个硅离子和两个氧离子交替排列（氧离子是成对出现的）。

1— 正电荷等效中心
2— 负电荷等效中心

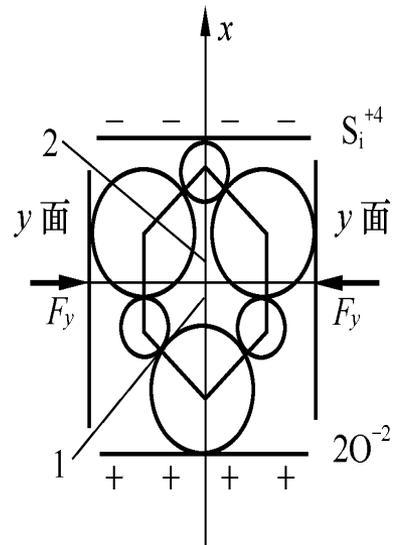
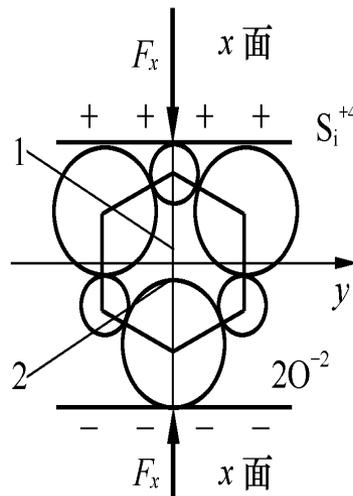
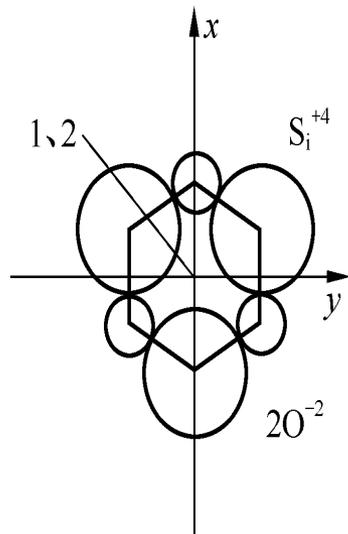


(a) 未受力的石英晶体 (b) 受 x 向压力时的石英晶体 (c) 受 y 向压力时的石英晶体

分析说明

(1) 当晶体无外力作用时，晶格无变形；或在光轴（ z 轴）方向受力时，由于晶格变形不会引起正负电荷中心的分离，所以不会产生压电效应。

1— 正电荷等效中心
2— 负电荷等效中心

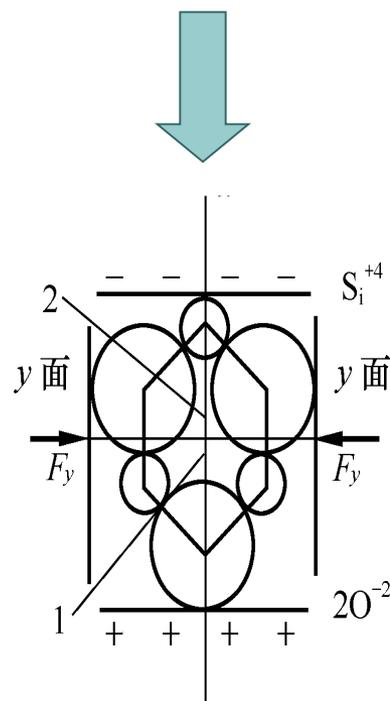
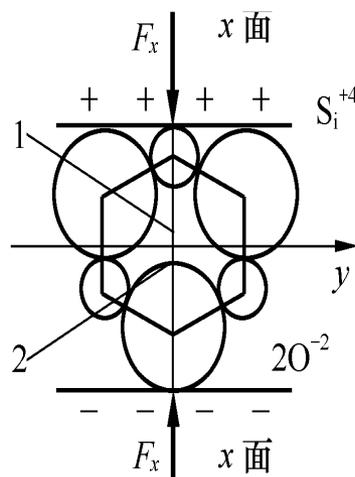
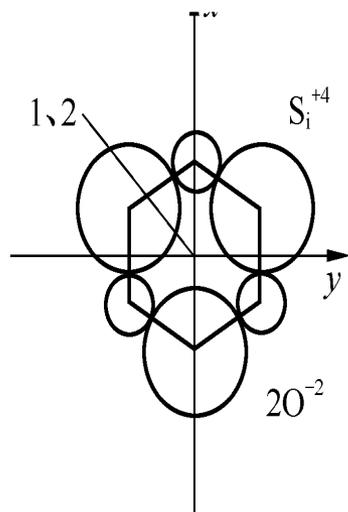


(a) 未受力的石英晶体 (b) 受 x 向压力时的石英晶体 (c) 受 y 向压力时的石英晶体

分析说明

沿着 **Y** 轴施加作用力，在垂直于 **X** 轴的表面上产生电荷，称为横向压电效应。

- 1— 正电荷等效中心
- 2— 负电荷等效中心



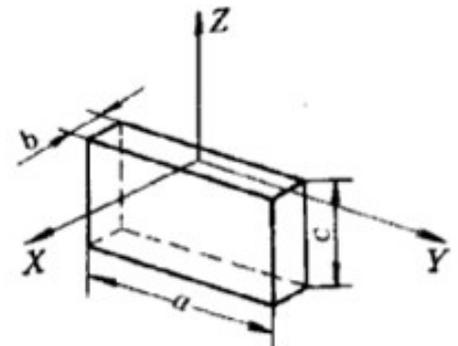
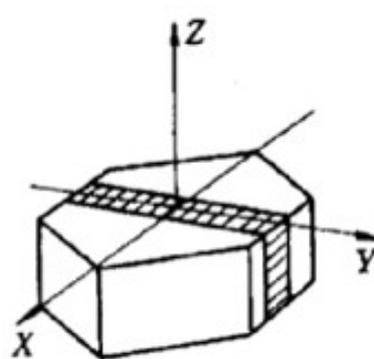
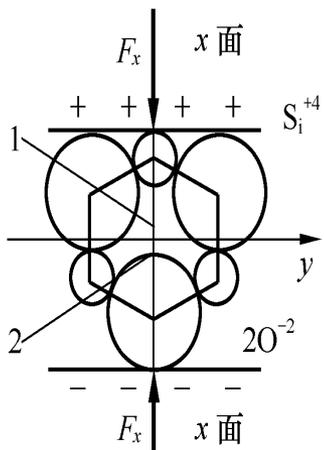
(a) 未受力的石英晶体 (b) 受 x 向压力时的石英晶体 (c) 受 y 向压力时的石英晶体

纵向压电效应产生的电荷为

$$q_{xx} = d_{xx} F_x \text{ —— 与几何尺寸无关}$$

d_{xx} —— X 轴的压电系数

F —— X 轴方向施加的压力



(b) 受 x 向压力时的石英晶体

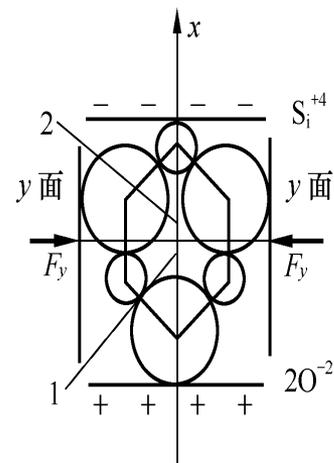
横向压电效应产生的电荷为

$$q_{XY} = d_{XY} \frac{a}{b} F_Y$$

尺寸有关（有放大作用）

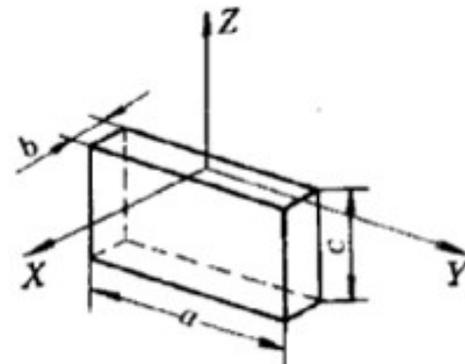
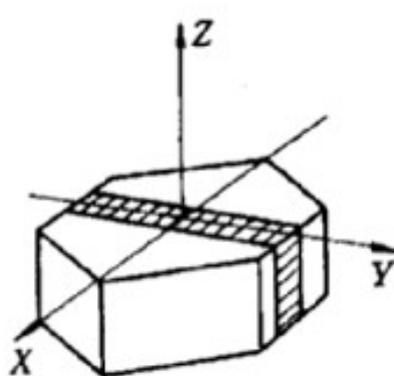
根据石英晶体的对称条件 $d_{XY} = -d_{XX}$ ，所以

$$q_{XY} = -d_{XX} \frac{a}{b} F_Y$$



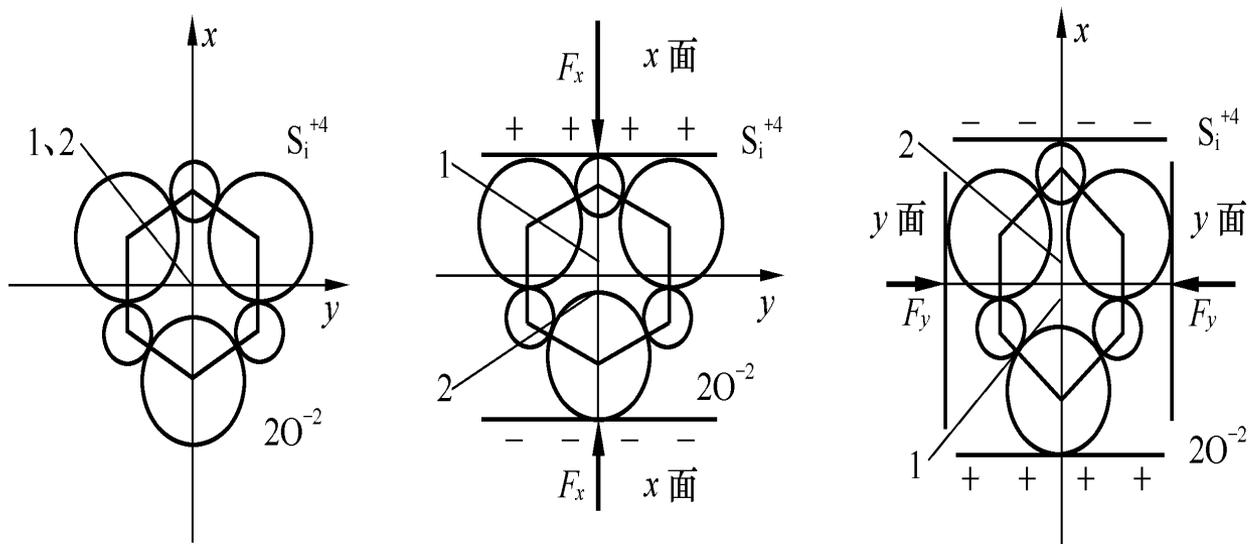
(c) 受y向压力时的石英晶体

—— 与几何



$$q_{XY} = -d_{XX} \frac{a}{b} F_Y$$

式中的负号说明沿 Y 机械轴的压力引起的电荷极性与沿 X 电轴的压力引起的电荷极性恰好相反。

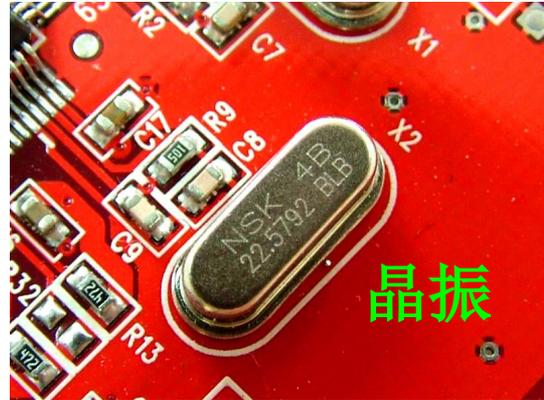
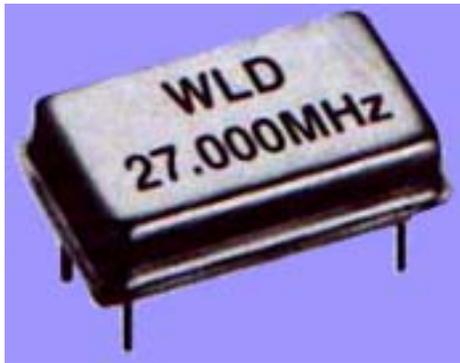


(a) 未受力的石英晶体 (b) 受 x 向压力时的石英晶体 (c) 受 y 向压力时的石英晶体

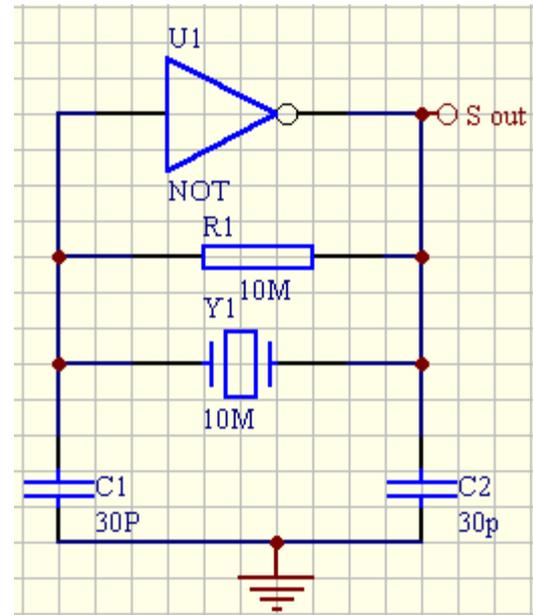
石英晶体特点

- (1) 压电、介电常数的温度稳定性好
- (2) 机械强度很高
- (3) 弹性系数较大
- (4) 适合测量大量程的力和加速度
- (5) 可作高精度和标准传感器
- (6) 价格比较高

石英晶体的应用例子：晶振

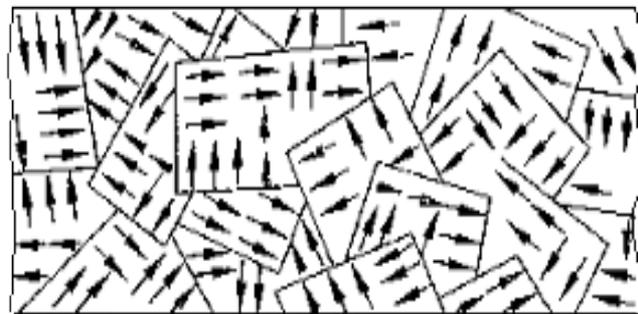


石英晶体在振荡电路中工作时，压电效应与逆压电效应交替作用，从而产生稳定的共振振荡频率。



3.2 压电陶瓷

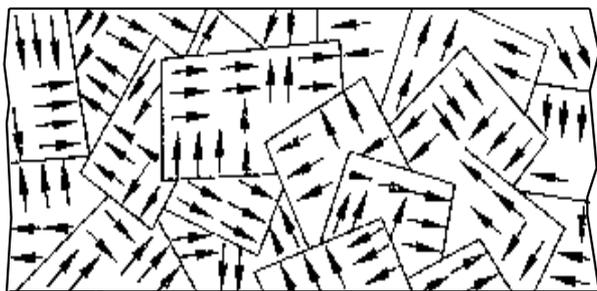
压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料。材料内部的晶粒有许多自发极化的电畴，在无外电场作用时，电畴在晶体中杂乱分布，不具有压电性质。



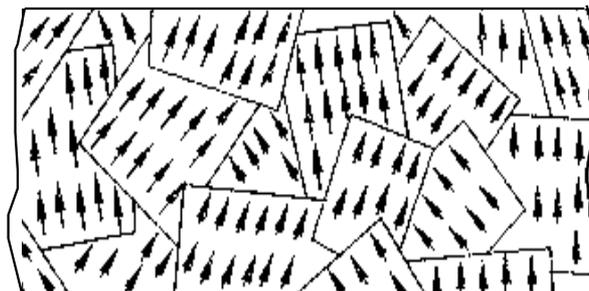
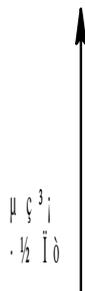
(a)

3.2 压电陶瓷的压电效应

在陶瓷上施加外电场时，电畴的极化方向发生转动，趋向于按外电场方向的排列，从而使材料得到极化。让外电场强度大到使材料的极化达到饱和的程度，当外电场去掉后，剩余极化强度很大，这时的材料才具有压电特性。

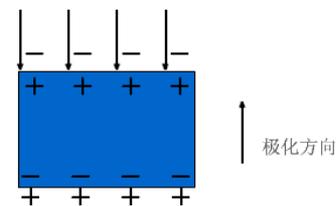
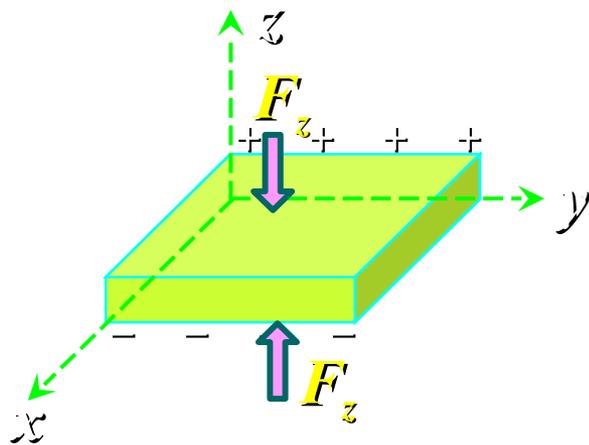


(a) 未极化

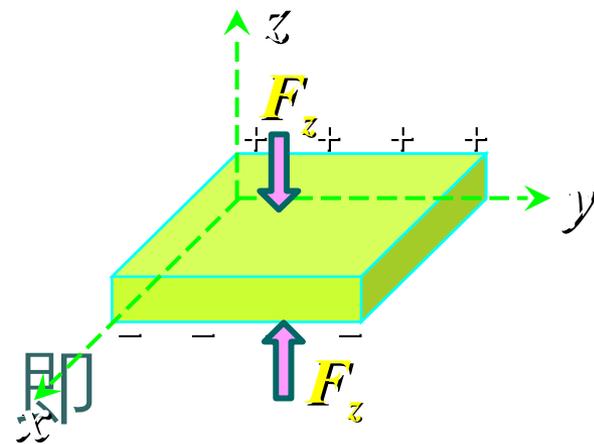


(b) 电极化

对于压电陶瓷，通常取它的极化方向为 z 轴，垂直于 z 轴的平面上任何直线都可作为 x 或 y 轴，这是和石英晶体的不同之处。当压电陶瓷在沿极化方向受 F_z 力时，则在垂直于 z 轴的上、下两表面上将会出现电荷



正压电效应



其电荷量 q 与作用力 F_z 成正比，

即

$$q = d_{zz} F_z$$

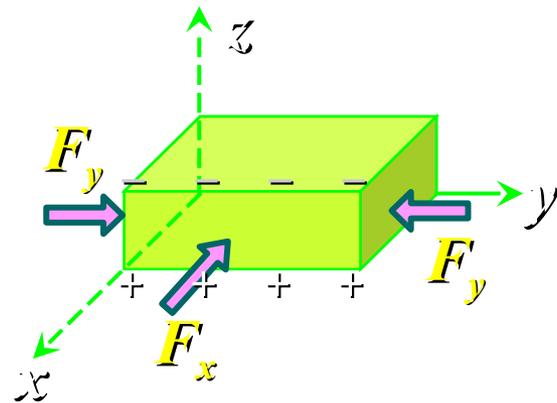
式中： d_{zz} ——压电陶瓷的压电系数，比石英晶体的大得多；

F_z ——作用力。

q 与尺寸无关



压电陶瓷在受到沿 y 方向的作用力 F_y 或沿 x 方向的作用力 F_x 时，在垂直于 z 轴的上、下平面上分别出现正、负电荷。



其电荷量 q 与作用力 F_y 、 F_x 也成正比，
即

$$q = -d_{zy} F_y \frac{A_z}{A_y} = -d_{zx} F_x \frac{A_z}{A_x}$$

式中 A_z ——极化面面积；

A_x 、 A_y ——受力面面积；

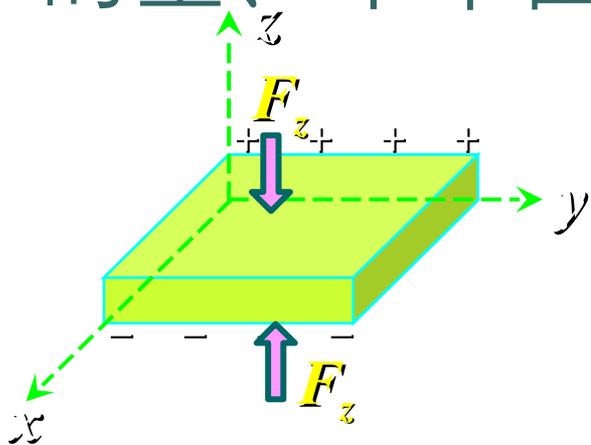
d_{zy} 、 d_{zx} ——压电陶瓷的横向压电系数

q 与面积有关

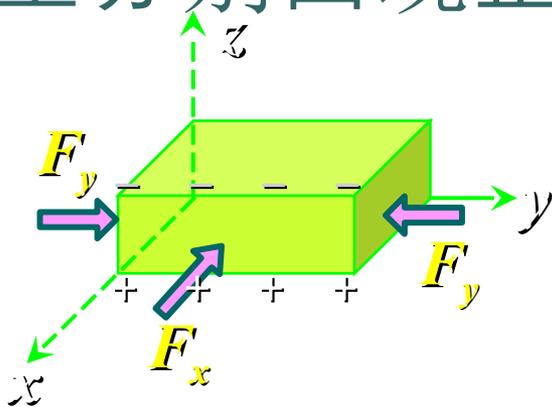


当作用力 F_z 、 F_y 或 F_x 反向时，电荷的极性也反向。

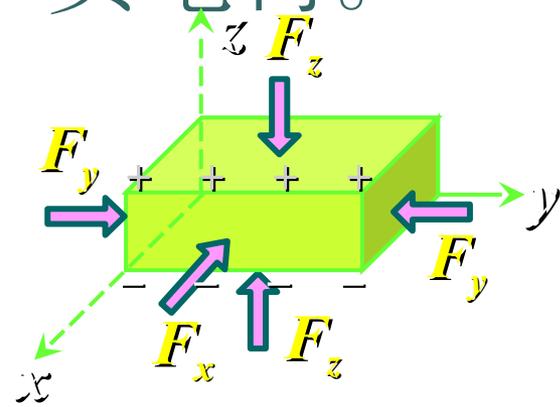
压电陶瓷在受到如图 (c) 所示的作用力 F_x 、 F_y 、 F_z 共同作用时，在垂直于 z 轴的上、下平面上分别出现正、负电荷。



(a) 纵向变形



(b) 横向变形



(c) 体积变形

压电陶瓷的变形方式

压电陶瓷的压电系数比石英晶体的大得多，所以采用压电陶瓷制作的压电式传感器的灵敏度较高。极化处理后的压电陶瓷材料的剩余极化强度和特性与温度有关，它的参数也随时间变化，其压电特性随时间衰减。



最早使用的压电陶瓷材料是钛酸钡（ BaTiO_3 ）。它的压电系数约为石英的 50 倍，但居里点温度只有 115°C ，使用温度不超过 70°C ，温度稳定性和机械强度都不如石英。

4. 压电材料

压电材料应具备以下几个主要特性：

- ① 具有较大的压电常数。
- ② 机械强度高、刚度大。
- ③ 高电阻率和大介电常数。
- ④ 温度和湿度稳定性要好，要求具有较高的居里点，获得较宽的工作温度范围。
- ⑤ 压电性能不随时间变化。



4.1 石英晶体

在几百摄氏度的温度范围内，其介电常数和压电系数几乎不随温度而变化。但是当温度升高到 573°C 时，石英晶体将完全丧去压电特性，这就是它的居里点。

石英晶体的突出优点是性能非常稳定，它有很大的机械强度和稳定的机械性能。但石英材料价格昂贵，且压电系数比压电陶瓷低得多。因此一般仅用于标准仪器或要求较高的传感器中。

石英晶体有天然和人工培养两种类型。人工培养的石英晶体的物理和化学性质几乎与天然石英晶体没有区别，因此目前广泛应用成本较低的人造石英晶体。

因为石英是一种各向异性晶体，因此，按不同方向切割的晶片，其物理性质（如弹性、压电效应、温度特性等）相差很大。在设计石英传感器时，应根据不同使用要求正确地选择石英片的切型。

4.2 压电陶瓷

压电陶瓷主要有以下几种：

1. 钛酸钡压电陶瓷

它具有很高的介电常数和较大的压电系数（约为石英晶体的 50 倍）。不足之处是居里点温度低（ 120°C ），温度稳定性和机械强度不如石英晶体。

2. 锆钛酸铅系压电陶瓷 (PZT)

锆钛酸铅与钛酸钡相比，压电系数更大，居里点温度在 300°C 以上，各项机电参数受温度影响小，时间稳定性好。

此外，在锆钛酸中添加一种或两种其它微量元素（如铌、锶、锡、锰、钨等）还可以获得不同性能的 PZT 材料。因此锆钛酸铅系压电陶瓷是目前压电式传感器中**应用最广泛**的压电材料。

4.3 高分子压电材料

某些合成高分子聚合物薄膜经延展拉伸和电场极化后，具有一定的压电性能，这类薄膜称为高分子压电薄膜。

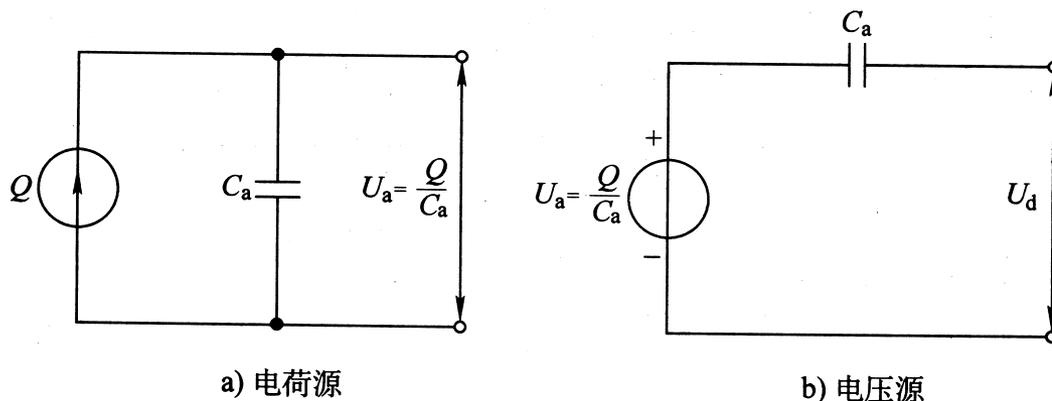
高分子压电材料是一种柔软的压电材料，不易破碎，可以大量生产和制成较大的面积，价格便宜。

主要应用在精度不高、振动测量、防盗等领域。

5、测量转换电路

(1) 压电元件的等效电路

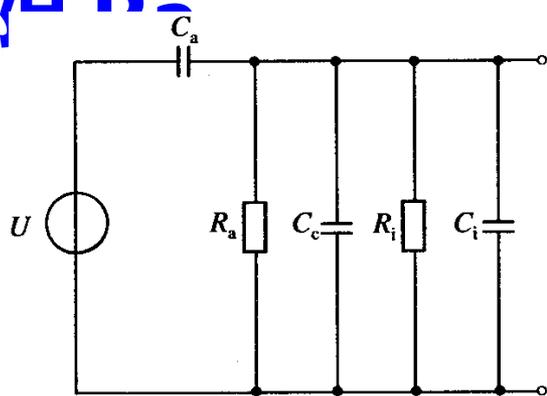
压电元件在承受沿敏感轴方向的外力作用时，就产生电荷，因此相当于一个电荷发生器。



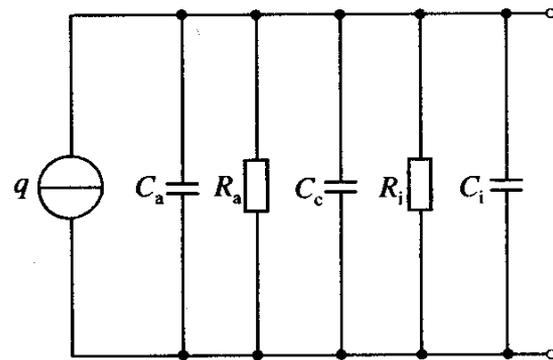
压电元件的等效电路

5.2 等效电路

- ◆ 测量系统中的实际等效电路，如图 3-16 所示。压电传感器在实际使用时总要与测量仪器或测量电路相连接，因此还须考虑连接电缆的等效电容 C_c ，放大器的输入电阻 R_i ，输入电容 C_i 以及压电传感器的漏电电阻 R_a 。



(a) 电压源



(b) 电

荷源

5.3 基本测量电路

压电传感器的内阻抗很高，而输出的信号微弱，因此一般不能直接显示和记录。压电传感器要求测量电路的前级输入端要有足够高的阻抗，这样才能防止电荷迅速泄漏而使测量误差变大。

压电传感器的前置放大器有两种：

- 1、电压放大器
- 2、电荷放大器



电压放大器

—— 将电压放大。

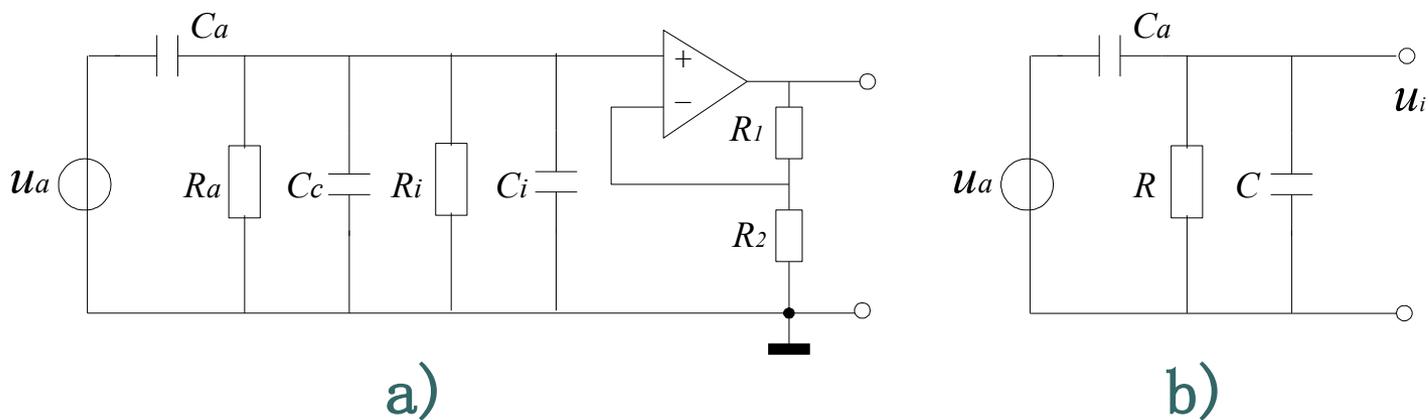
电荷放大器

—— 电荷放大器是一种输出电压与输入电荷量成正比的前置放大器。

1. 电压放大器

压电传感器接电压放大器的等效电路如下图 a 所示。
图 b 是简化后的等效电路。

$$R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} \quad u_i = \frac{Q}{C_c + C_i + C_a}$$



电压放大器的输出与电缆线电容及放大器输入电容有关，会受影响

2. 电荷放大器

电荷放大器是一种输出电压与输入电荷量成正比的前置放大器。

它实际上是一个具有反馈电容的高增益放大器。

公式中的 A 为运算放大器的开环放大倍数，多为数万~百万级。

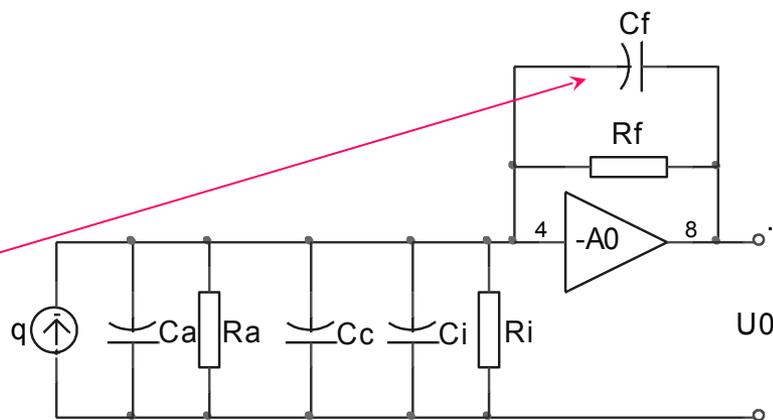
$$U_0 = \frac{-AQ}{C_i + C_c + C_a + (1+A)C_f}$$

由于 A 很大 \rightarrow

$$U_0 \approx -\frac{Q}{C_f}$$

电荷放大器的输出与电缆线电容及放大器输入电容无关，
电缆很长（上千米）都无明显影响，明显优于电压放大器。

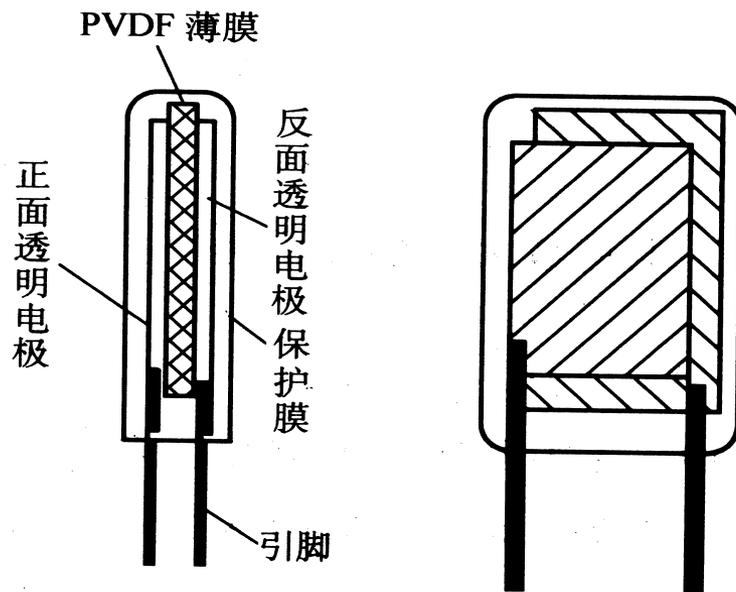
测量电路中，运算放大器和传感器可以任意互换。



电荷放大器等效电路

6、压电传感器的应用

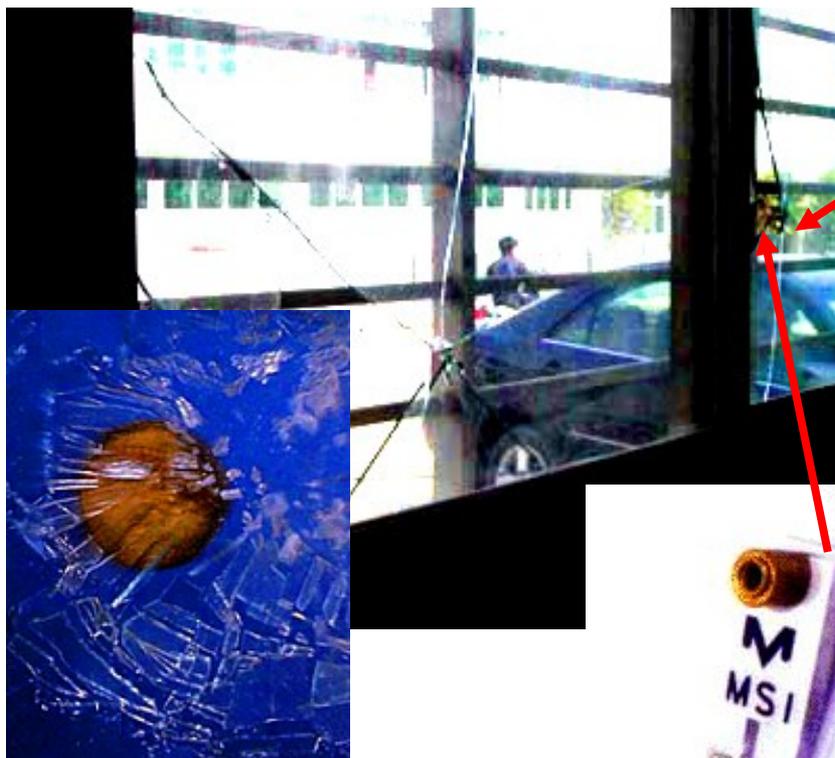
(1) 玻璃打碎报警装置



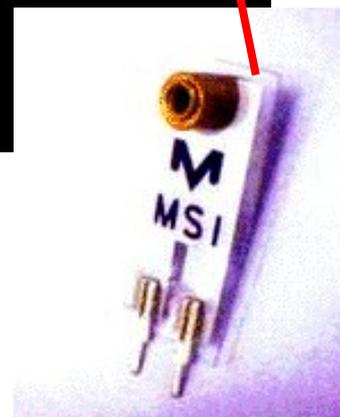
高分子压电薄膜振动感应片

(1) 玻璃打碎报警装置

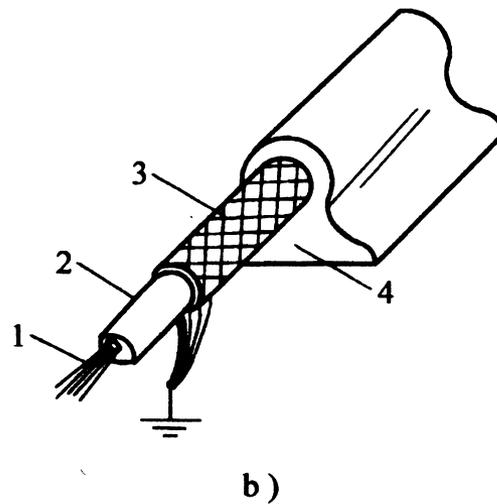
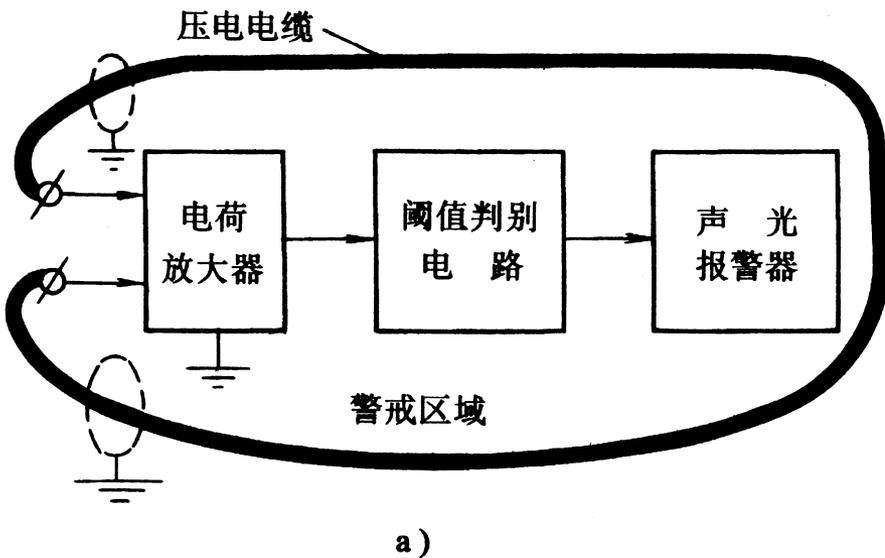
将高分子压电测振薄膜粘贴在玻璃上，可以感受到玻璃破碎时会发出的振动，并将电压信号传送给集中报警系统。



粘贴位置



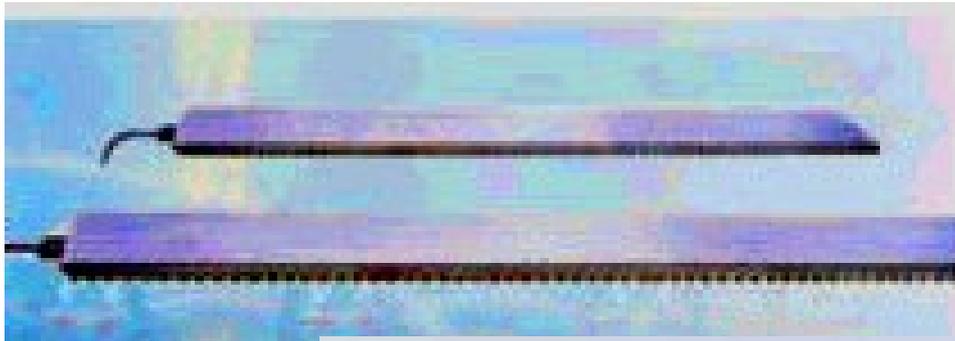
(2) 压电式周界报警系统



高分子压电电缆周界报警系统



高分子压电材料制作的压电薄膜和电缆





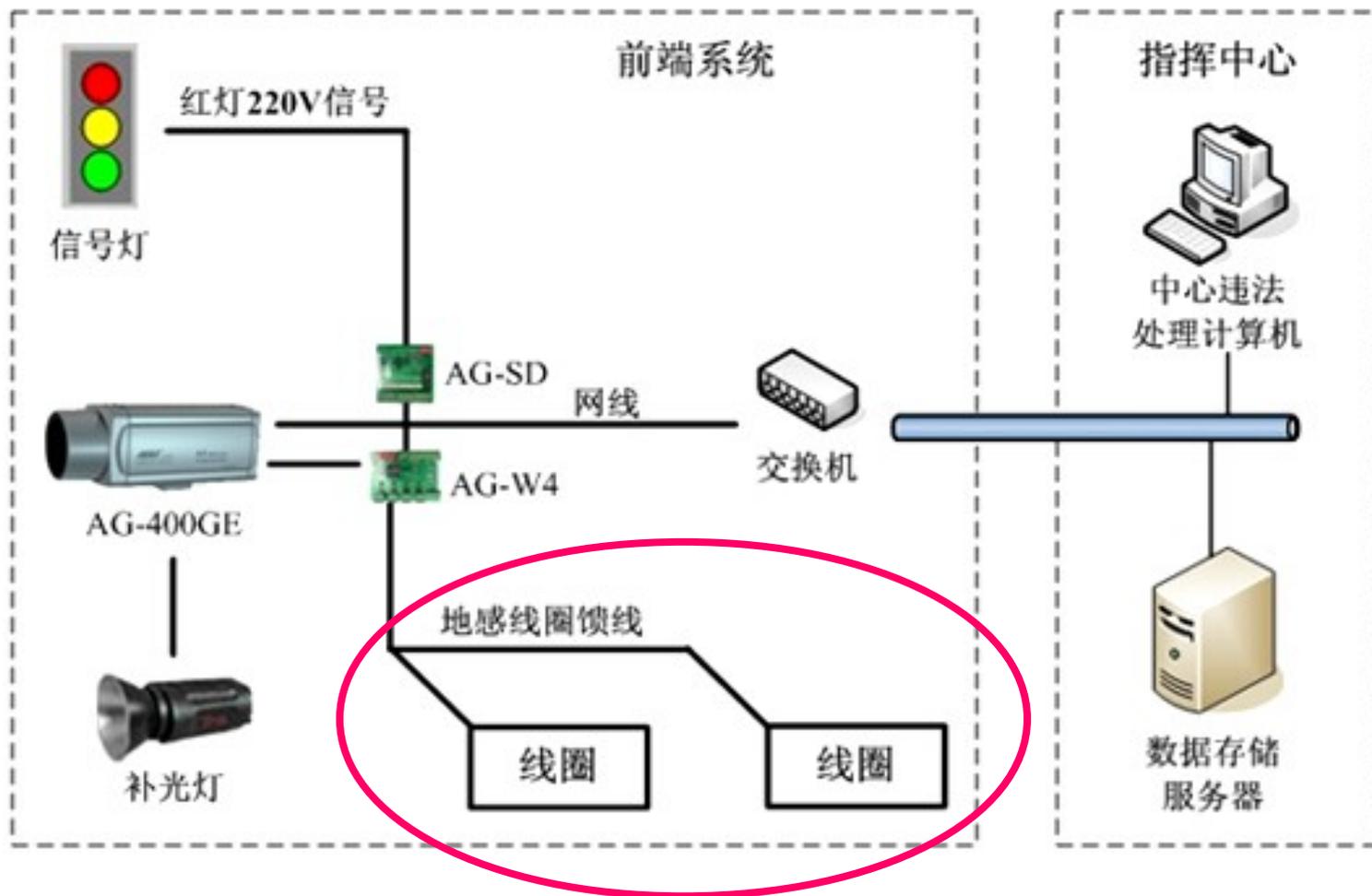
可用于波形分析及报警的高分子压电踏脚板



压电式脚踏报警器



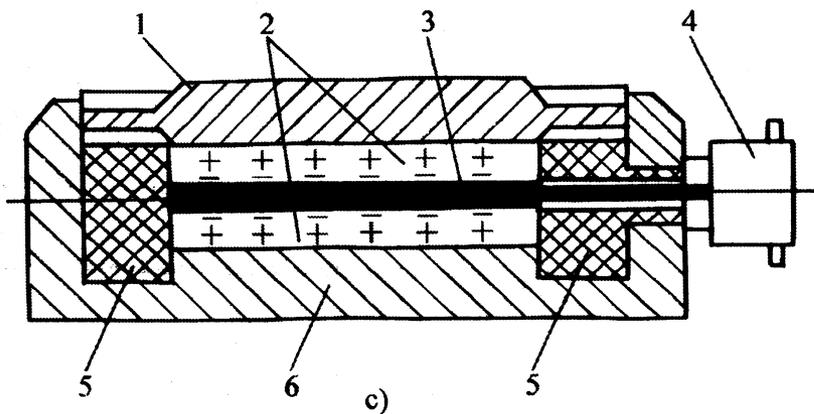
(3) 闯红灯抓拍照片系统



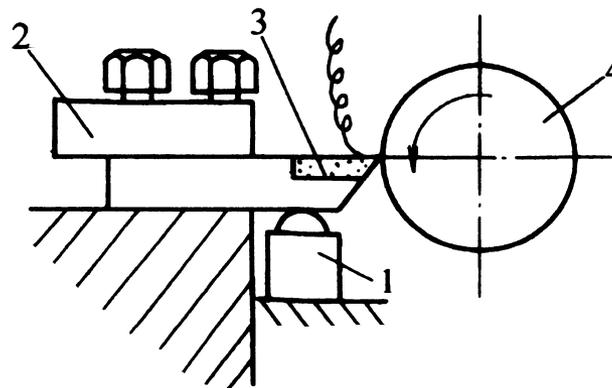
闯红灯触发抓拍的原理



(4) 压电陶瓷用于动态力的检测



压电式单向动态力传感器



刀具切削力测量示意图

三、课题小结

- (1) 压电式传感器的工作原理 ；
- (2) 压电效应、压电式传感器的类型、结构和压电材料 ；
- (3) 压电式传感器的测量转换电路 ；
- (4) 压电式传感器的应用 。

作业

书 P56.

一、第 4. 题