



传感器原理与应
传感器应用

传感器原理及应 传感器应用

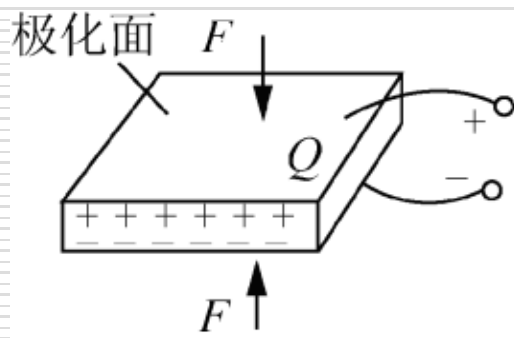
第5章 压电式传感器



第五章 压电式传感器

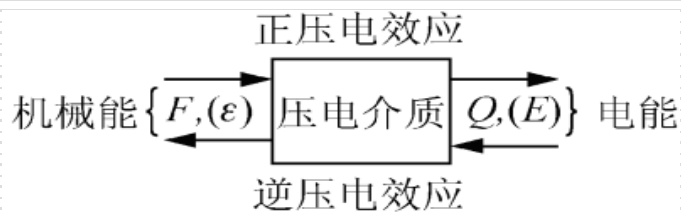
5.1 压电效应

压电效应：某些单晶体或多晶体陶瓷电介质，当沿着一特定方向对其施力而使它产生机械变形时，其内部将产生极化现象，并在它的两个相应晶面上产生符号相反的等量电荷；当外力取消后，电荷也随之消失，晶体又重新恢复不带电状态





逆压电效应：当在电介质的极化方向上施加电场(电压)作用时，这些电介质晶体会在一特定的晶轴方向上产生机械变形或机械压力；外加电场消失时，这些变形或应力也随之消失，此种现象称为逆压电效应，或称电致伸缩现象





压电方程：压电材料在外力作用下产生的表面电荷一般用压电方程表达

$$q_i = d_{ij} \sigma_j \quad \text{或} \quad Q_i = d_{ij} F_j$$

式中：

q_i —— i 面上的电荷密度 (C/cm²)；

Q_i —— i 面上的总电荷量 (C)；

σ_j —— j 方向的应力 (N/cm²)；

F_j —— j 方向的作用力；

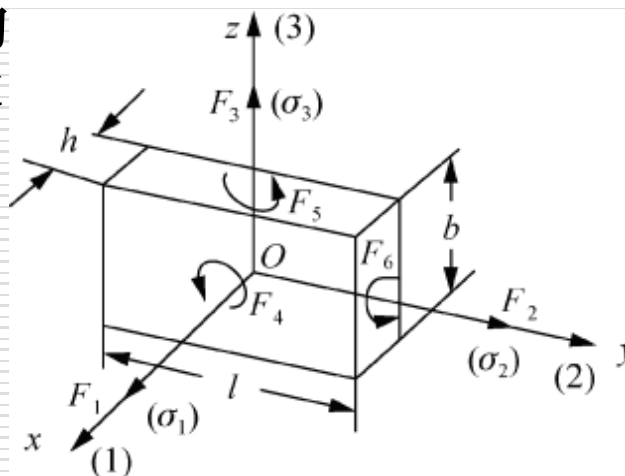
D_{ij} —— 材料的压电常数 (C/N)， ($i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$)。

i —— 表达晶体的极化方向，当产生电荷的表面垂直于 x 轴 (y 轴或 z 轴)时

$i=1$ (或 $2, 3$)

j —— $1, 2, 3, 4, 5, 6$ ，分别表达沿 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的单向应力，和在垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面 (yz 平面、 zx 平面、 xy 平面)内作用的剪切力。

d_{ij} 的符号 —— 电场方向指向晶轴的正向时为正，反之为负。





晶体在任意受力状态下所产生的表面电荷密度可由下列方程组决定

$$\begin{cases} q_1 = d_{11}\sigma_1 + d_{12}\sigma_2 + d_{13}\sigma_3 + d_{14}\sigma_4 + d_{15}\sigma_5 + d_{16}\sigma_6 \\ q_2 = d_{21}\sigma_1 + d_{22}\sigma_2 + d_{23}\sigma_3 + d_{24}\sigma_4 + d_{25}\sigma_5 + d_{26}\sigma_6 \\ q_3 = d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 + d_{33}\sigma_3 + d_{34}\sigma_4 + d_{35}\sigma_5 + d_{36}\sigma_6 \end{cases}$$

压电材料的压电特征能够用它的压电常数矩阵表达

$$(d_{ij}) = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}$$

5.2 压电材料和它的主要特征

5.2.1 石英晶体

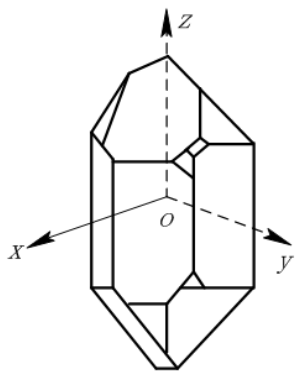
1. 石英晶体的压电效应

天然构造石英晶体的理想外形是一种正六面体，在晶体学用三根相互垂直的轴来表达，

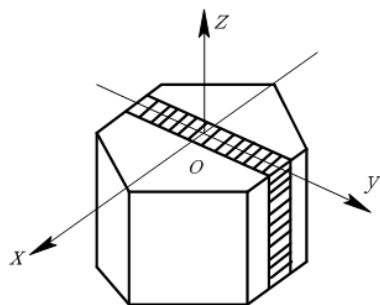
Z—Z轴——光轴，

X—X轴——电轴，经过正六面体棱线，并垂直于光轴

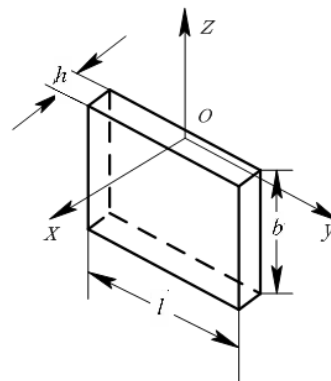
Y—Y轴——机械轴，与X—X轴和Z—Z轴同步垂直



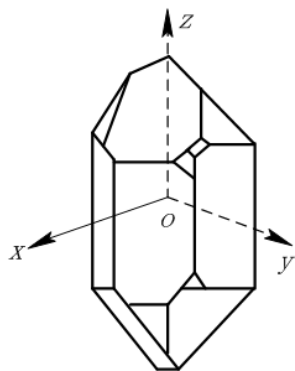
(a)晶体外形



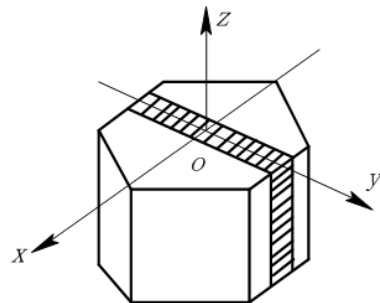
(b)轴定义



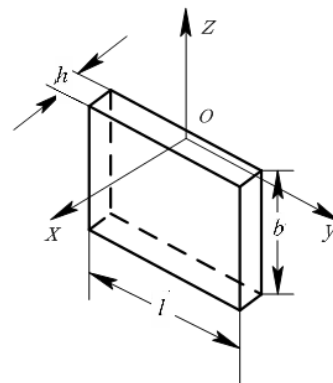
(c)切割晶片



(a)晶体外形



(b)轴定义



(c)切割晶片

纵向压电效应——沿电轴 $X-X$ 方向的力作用下产生的压电效应

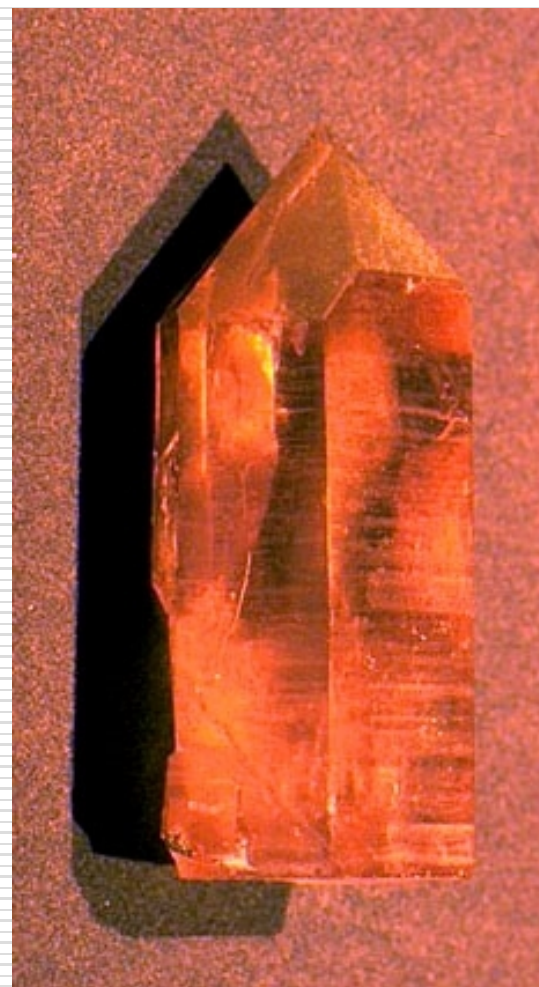
横向压电效应——沿机械轴 $Y-Y$ 方向的力作用下产生的压电效应

沿光轴 $Z-Z$ 方向受力则不产生压电效应。

只在垂直于 X 轴的平面上积聚电荷

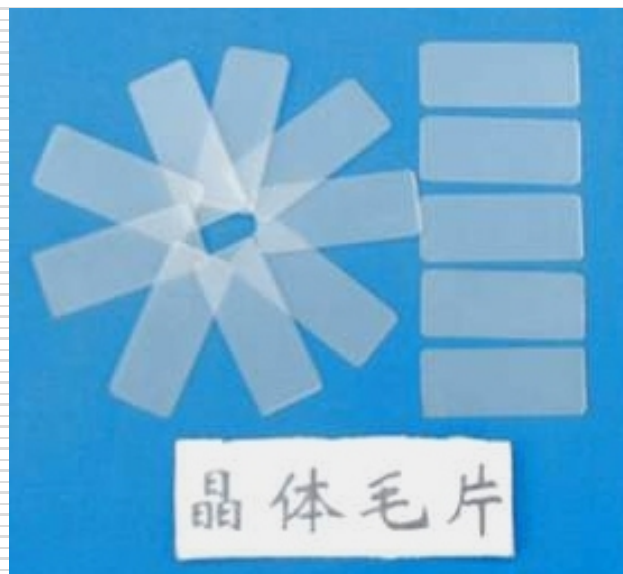


天然石英晶体外形





从石英晶体切下晶体切片后，在其垂直 X 轴方向的两个表面用真空镀膜或沉银法得到两个电极面。





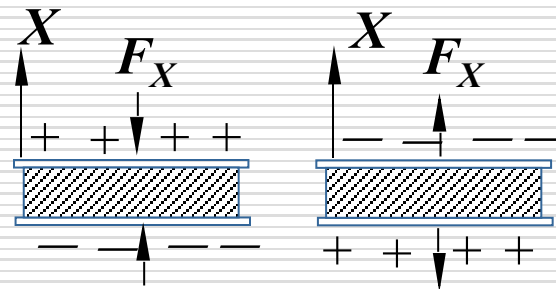
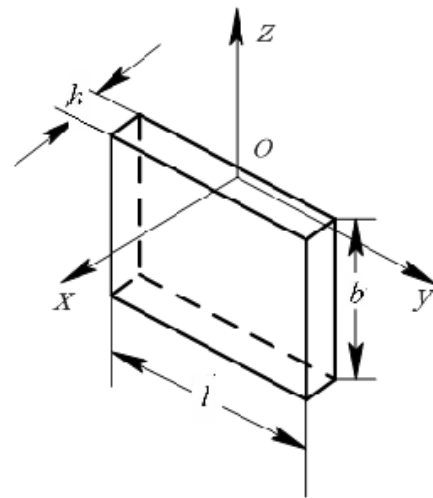
纵向压电效应：当晶片受到沿 x 轴方向的压应力 σ_x 作用时，晶片将产生厚度变形，并发生极化的现象

$$P_x = d_{11} \sigma_x = d_{11} \frac{F_x}{lb}$$

$$P_x = q_x = Q_x / lb$$

$$Q_x = d_{11} F_x$$

注：按前述坐标系为左旋石英晶体，右旋石英晶体的构造与左旋石英晶体成镜像对称，压电效果极性相反。



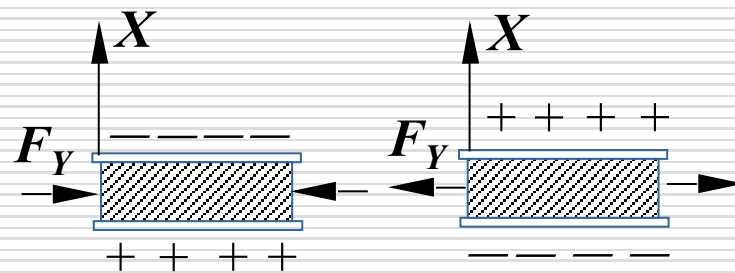
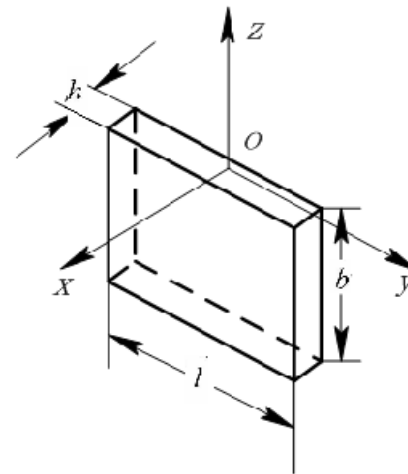


横向压电效应：当晶片作用力是沿着机械轴的方向时，晶片将产生宽度方向的变形，并发生极化的现象则为横向压电效应。其电荷仍在与X轴垂直平面上出现，

$$Q_x = d_{12} \frac{lb}{bh} F_y = d_{12} \frac{l}{h} F_y$$

根据石英晶体轴对称条件： $d_{11} = -d_{12}$

$$Q_x = -d_{11} \frac{l}{h} F_y$$

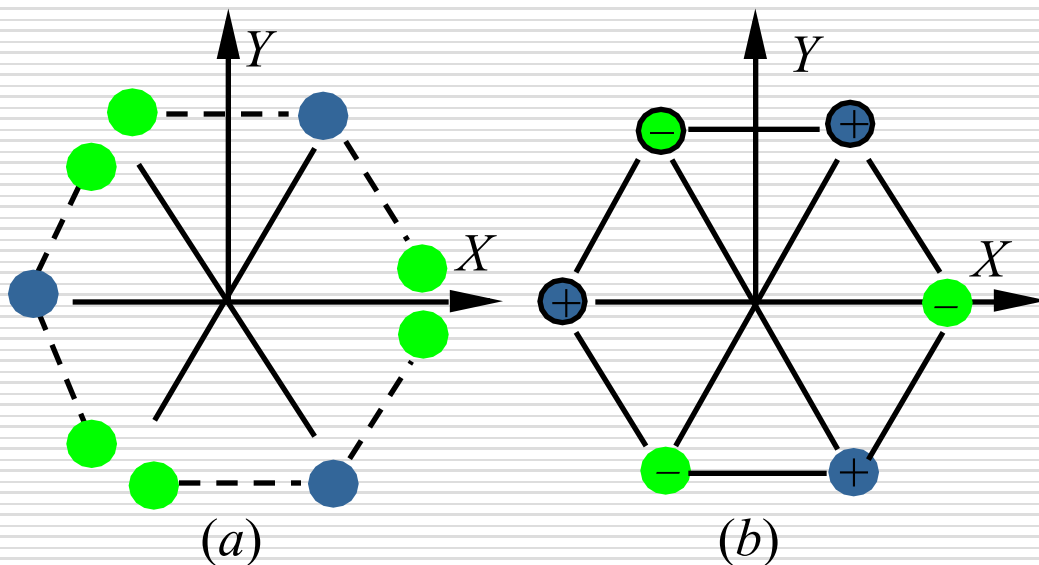




- ①产生压电效应时，其作用力（或应变）与电荷（或电场强度）之间呈线性关系；事实表白，逆压电效应时两者也成线性关系
 - ②晶体在哪个方向上有正压电效应，则在此方向上一定存在逆压电效应；
 - ③石英晶体不是在任何方向都存在压电效应的。
- 另外，石英晶体在切向力作用下也会产生压电效应

2. 石英晶体产生压电压电效应的机理

石英晶体具有压电效应，是由于晶格结构在机械力的作用下发生变形所引起的。石英晶体的化学分子式为 SiO_2 ，在一个晶体结构单元(晶胞)中，有 3 个硅离子 Si^{4+} 和 6 个氧离子 O^{2-} ，后者是成对的，所以一个硅离子和二个氧离子交替排列，硅、氧离子呈正六边形排列，



(a) 硅氧离子在 XZ 平面上的投影

(b) 等效为正六边形排列的投影



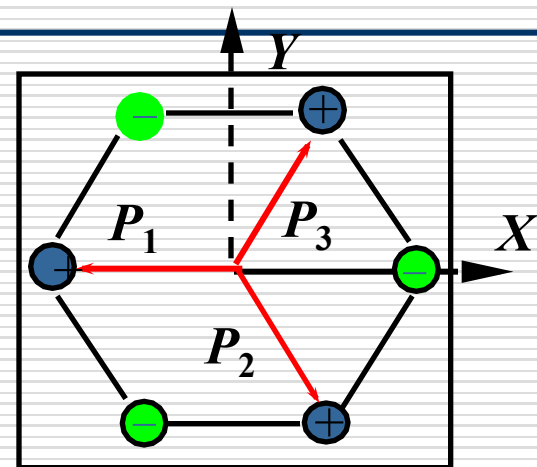
当外力0时，正、负离子分布在正六边形顶角上，形成三个互成 120° 夹角的偶极矩 P_1 、 P_2 、 P_3 ，此时正负电荷中心重叠，电偶极矩的矢量和等于零，即

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0$$

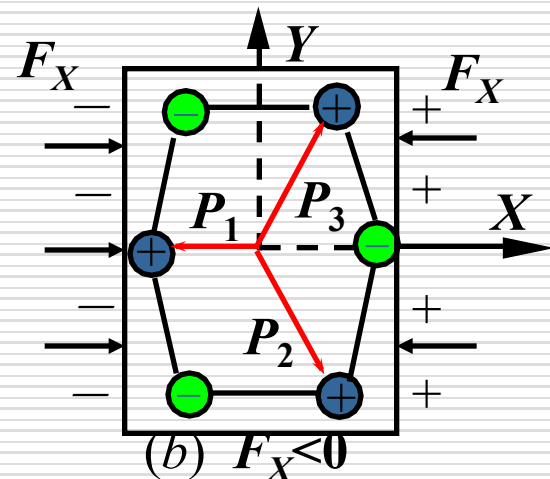
当晶体受到沿 X 方向的压力 ($F_x < 0$) 作用时，晶体沿 X 方向将产生压缩，正、负离子相对位置随之发生变化，此时正、负电荷中心不再重叠，电偶极矩在 X 方向的分量为 $(P_1 + P_2 + P_3)_x > 0$ ，在 Y 、 Z 方向上的分量为

$$(P_1 + P_2 + P_3)_y = 0 \quad (P_1 + P_2 + P_3)_z = 0$$

所以，在 X 轴的正向出现正电荷，在 Y 、 Z 轴方向则不出现电荷。



(a) $F_x = 0$



(b) $F_x < 0$

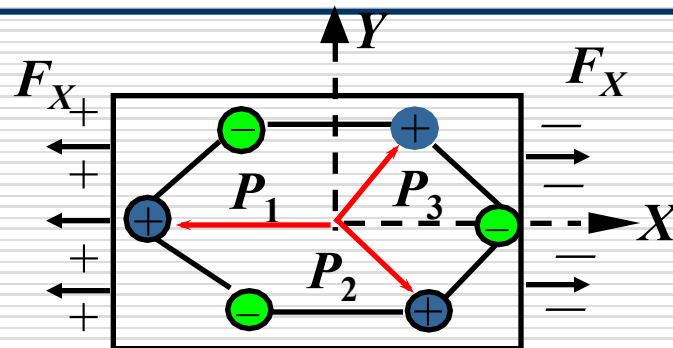
当晶体受到沿 X 方向的拉力作用 ($F_X > 0$)，使其受到压缩，此时电极矩的三个分量为

$$(P_1 + P_2 + P_3)_X < 0$$

$$(P_1 + P_2 + P_3)_Y = 0$$

$$(P_1 + P_2 + P_3)_Z = 0$$

在 X 轴的正向出现负电荷，在 Y 、 Z 方向则不出现电荷。它在 X 方向产生正压电效应，而 Y 、 Z 方向则不产生压电效应。



晶体在 Y 轴方向力 F_Y 作用下的情况与 F_X 相同。当 $F_Y > 0$ 时，晶体的形变与 $F_X < 0$ 相同；当 $F_Y < 0$ 时相同。由此可见，晶体在 Y （即机械轴）方向的力 F_Y 作用下，使它在 X 方向产生正压电效应，在 Y 、 Z 方向则不产生压电效应。

晶体在 Z 轴方向力 F_Z 的作用下，不变化晶体的晶格构造，所以，正、负电荷中心保持重叠，电偶极矩矢量和等于零。所以沿 Z （即光轴）方向的力 F_Z 作用下，晶体不产生压电效应。



当切应力 σ_4 (或 τ_{yz}) 作用于晶体时产生切应变，在 x 方向上有伸缩应变，产生压电效应，其相应的压电常数为： $d_{14} \neq 0$ ， $d_{15} = d_{16} = 0$ 。

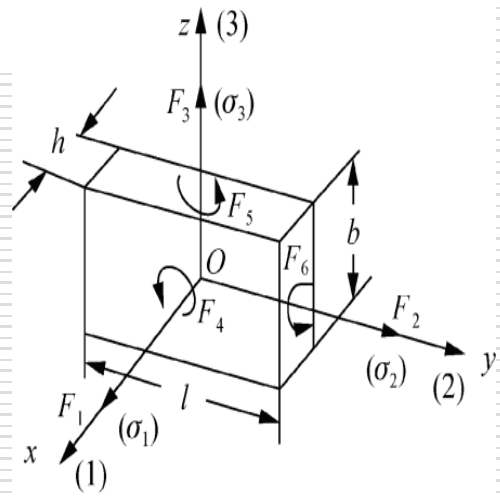
当切应力 σ_5 和 σ_6 (或 τ_{zx} 和 τ_{xy}) 作用时都产生切应变，这种应变改变了 y 方向上 $P=0$ 的状态。产生压电效应，其相应的压电常数为

$$\begin{matrix} d_{15}=0 & d_{25} \neq 0 & d_{35}=0 \\ d_{16}=0 & d_{26} \neq 0 & d_{36}=0 \end{matrix}$$

而且有 $d_{25} = -d_{14}$ ， $d_{26} = -2d_{11}$ 。所以，石英晶体压电常数矩阵为

$$(d_{ij}) = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

只有两个独立常数： $d_{11} = 2.31 \text{ pC/N}$ ； $d_{14} = 0.727 \text{ pC/N}$ 。





5.2.2 压电陶瓷

1. 压电陶瓷的压电效应

看成用力沿极化方向时，在极化面上出现电荷：

$$Q = d_{33}F$$

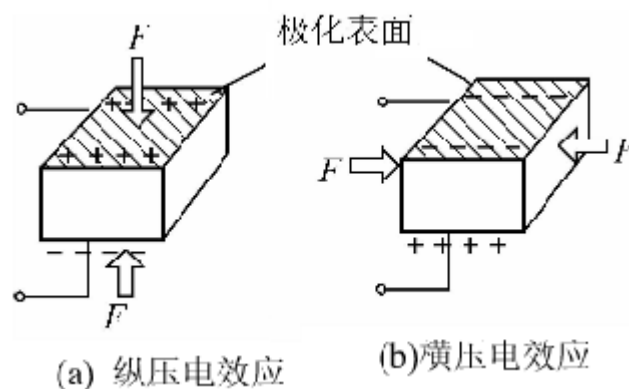
d_{33} —压电陶瓷的纵向压电常数。

看成用力垂直极化方向时，在极化面上出现电荷：

$$Q = -d_{32} \frac{S_x}{S_y} F = -d_{31} \frac{S_x}{S_y} F$$

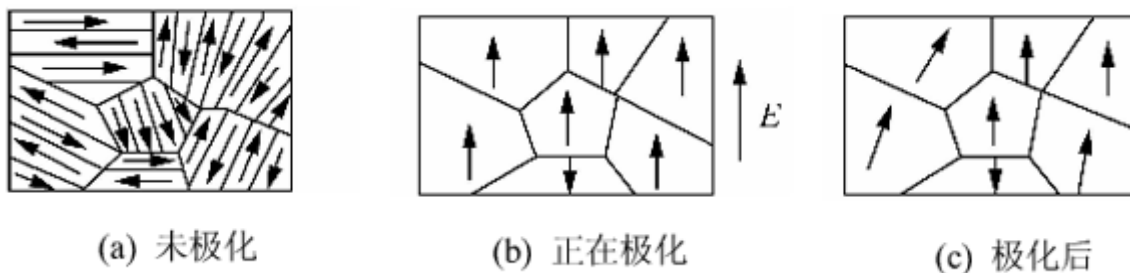
S_x —极化面的面积；

S_y —受力面的面积



2. 压电陶瓷压电效应产生的机理

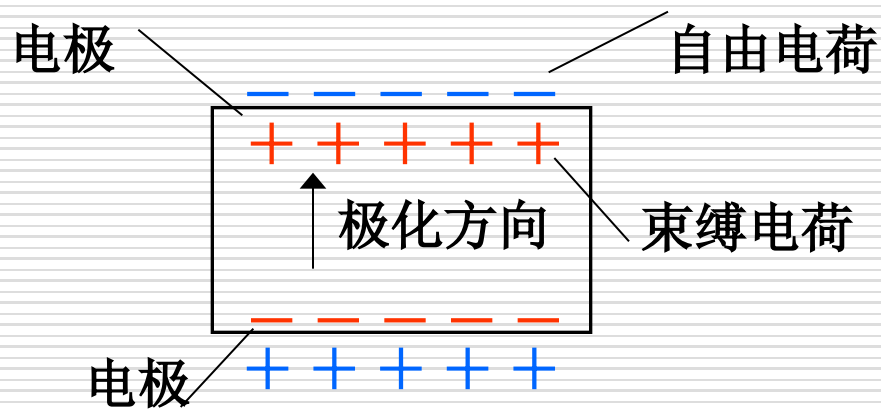
压电陶瓷属于铁电体一类的物质，是人工制造的多晶压电材料，它具有类似铁磁材料磁畴构造的**电畴**构造。电畴是分子自发形成的区域，它有一定的极化方向，从而存在一定的电场。在无外电场作用时，各个电畴在晶体上杂乱分布，它们的极化效应被相互抵消，所以原始的压电陶瓷内极化强度为零



在外电场 $E(20\sim30\text{ kV/cm})$ 作用下，“电畴”自发的极化方向将向外电场 E 的方向发生转动，去外电场 E 后，压电陶瓷内部出现：剩余极化强度，压电陶瓷成为压电材料，



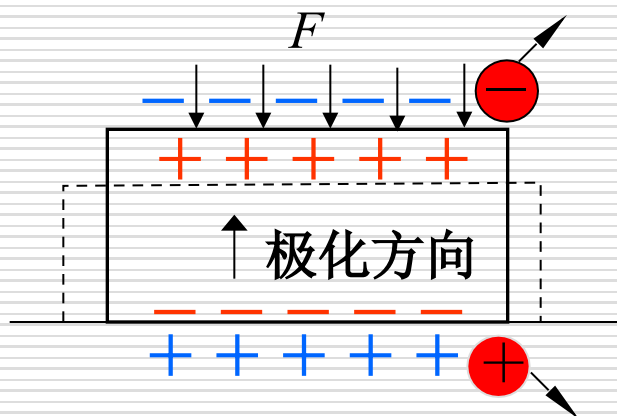
陶瓷片内的极化强度是以**电偶极矩**的形式体现出来，即在陶瓷的一端出现正束缚电荷，另一端出现负束缚电荷。而在陶瓷片的电极面上吸附来自外界的自由电荷。这些自由电荷与陶瓷片内的束缚电荷符号相反而数量相等，它起着屏蔽和抵消陶瓷片内极化强度对外界的作用。所以陶瓷片对外部不呈现带电性





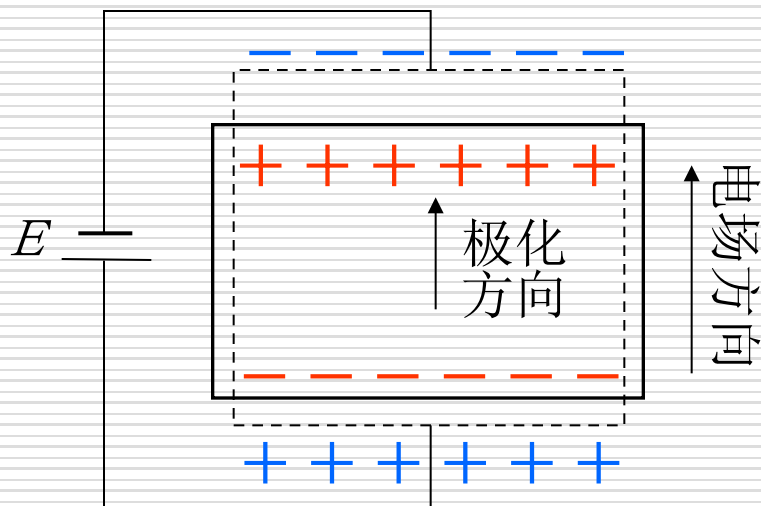
传感器原理与应用

假如在陶瓷片上加一种与极化方向平行的压力 F ，陶瓷片将产生压缩形变，片内的正、负束缚电荷之间的距离变小，极化强度也变小。所以，原来吸附在电极上的自由电荷，有一部分被释放，而出现放电现象，当压力撤消后，陶瓷片恢复原状(这是一种膨胀过程)，片内的正、负电荷之间的距离变大，极化强度也变大，所以电极上又吸附一部分自由电荷而出现充电现象。这种由机械能转变为电能的现象就是压电陶瓷的正压电效应。





一样，若在陶瓷片上加一种与极化方向相同的电场，因为电场的方向与极化强度的方向相同，所以电场的作用使极化强度增大。这时，陶瓷片内的正负束缚电荷之间距离也增大，陶瓷片沿极化方向产生伸长形变。同理，假如外加电场的方向与极化方向相反，则陶瓷片沿极化方向产生缩短形变。这种因为电效应而转变为机械效应或者由电能转变为机械能的现象，就是逆压电效应。





5.2.3 压电材料的主要特征

压电材料主要特征：

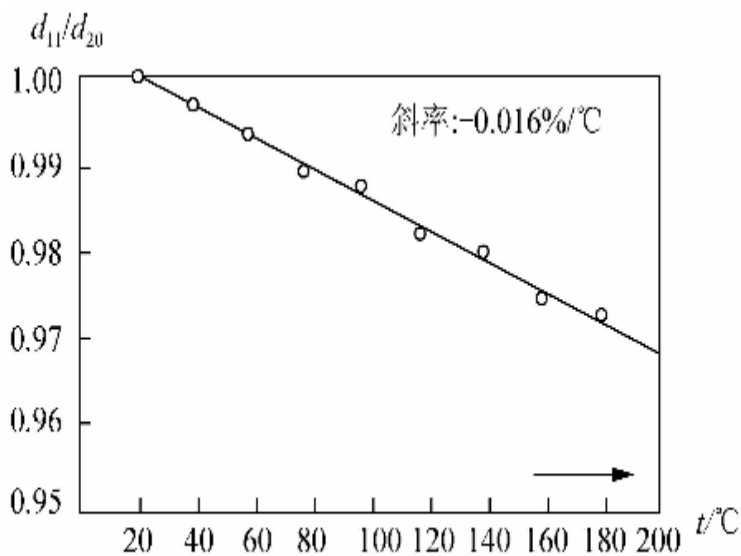
- ①转换性能。要求具有较大压电常数。
- ②机械性能。压电元件作为受力元件，希望它的机械强度高、刚度大，以期取得宽的线性范围和高的固有振动频率。
- ③电性能。希望具有高电阻率和大介电常数，以减弱外部分布电容的影响并取得良好的低频特征。
- ④环境适应性强。温度和湿度稳定性要好，要求具有较高的居里点，取得较宽的工作温度范围。
- ⑤时间稳定性。要求压电性能不随时间变化。



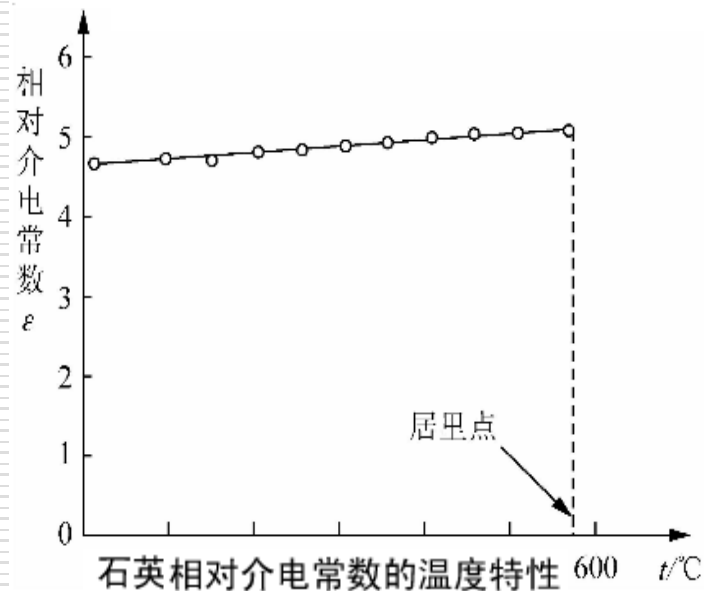
(1) 压电晶体

石英晶体 (SiO_2)

是一种具有良好压电特征的压电晶体。其介电常数和压电系数的温度稳定性相当好，在常温范围内这两个参数几乎不随温度变化，在 $20^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内，温度每升高 1°C ，压电系数仅降低 0.016% 。但是当到 573°C 时，它完全失去了压电特征，这就是它的居里点。



石英的 d_{11} 系数相对于 20°C 的 d_{11} 温度变化特性





石英晶体的突出优点是性能非常稳定，机械强度高，绝缘性能也相当好。但石英材料价格昂贵，且压电系数比压电陶瓷低得多。所以一般仅用于**原则仪器**或要求较高的传感器中。

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



水溶性压电晶体

属于单斜晶系的有酒石酸钾钠 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), 酒石酸乙烯二铵 ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$, 简称EDT), 酒石酸二钾 ($\text{K}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 简称DKT), 硫酸锂 ($\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。属于正方晶系的有磷酸二氢钾 (KH_2PO_4 , 简称KDP), 磷酸二氢氨 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 简称ADP), 砷酸二氢钾 (KH_2AsO_4 , 简称KDA), 砷酸二氢氨 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$, 简称ADA)。

2. 压电陶瓷

(1) 钛酸钡压电陶瓷

钛酸钡 (BaTiO_3) 是由碳酸钡 (BaCO_3) 和二氧化钛 (TiO_2) 按1: 1分子百分比在高温下合成的压电陶瓷。

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)

锆钛酸铅是由 PbTiO_3 偏钛酸铅和 PbZrO_3 偏锆酸铅构成的固溶体。它与钛酸钡相比，压电系数更大，居里温度在 300°C 以上，各项机电参数受温度影响小，时间稳定性好。另外，在锆钛酸中添加一种或两种其他微量元素 (如铌、锶、锡、锰、钨等) 还能够取得不同性能的PZT材料。所以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。



(3) 压电聚合物

聚二氟乙烯（ PVF_2 ）是目前发觉的压电效应较强的**聚合物薄膜**，这种合成高分子薄膜就其对称性来看，不存在压电效应，但是它们具有“**平面锯齿**”构造，存在抵消不了的**偶极子**。经延展和拉伸后能够使分子**链轴**成规则排列，并在与分子轴垂直方向上产生**自发极化偶极子**。当在膜厚方向加直流高压电场极化后，就能够成为具有压电性能的高分子薄膜。这种薄膜有可挠性，并轻易制成大面积压电元件。这种元件耐冲击、不易破碎、稳定性好、频带宽。为提升其压电性能还能够掺入压电陶瓷粉末，制成混合复合材料（ PVF_2 —PZT）。



高分子压电薄膜及控制





传感器原理与应用



用于波形分析及报警的高分子压电脚踏板



压电式脚踏报警器



传感器原理与应用



高分子压电薄膜制作的压电喇叭
(逆压电效应)



(4) 压电半导体材料

如ZnO、CdS、ZnO、CdTe，这种力敏器件具有敏捷度高，响应时间短等优点。另外用ZnO作为表面声波振荡器的压电材料，可测取力和温度等参数。

(5) 铌酸盐系压电陶瓷。



5.3 压电元件的常用构造形式

5.3.1 压电元件的基本变形方式

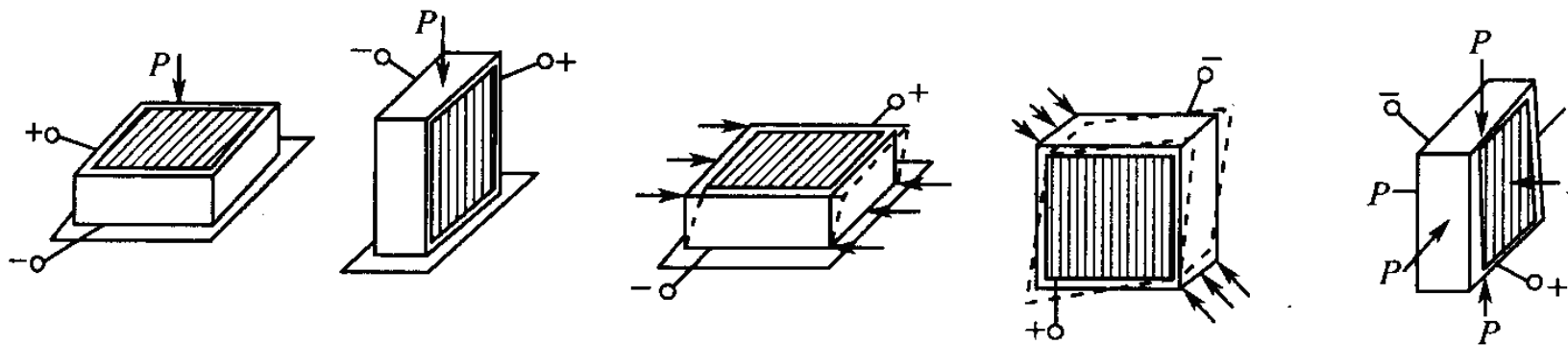
1.对能量转换有意义的石英晶体变形方式:

(1)厚度变形 (*TE*方式): 利用石英晶体的纵向压电效应

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x \quad \text{或} \quad q_x = d_{11} \cdot \sigma_x$$

(2)长度变形 (*LE*方式): 利用石英晶体的横向压电效应

$$Q_y = d_{12} \cdot F_y \cdot S_{xx} / S_{yy} \quad \text{或} \quad q_x = d_{12} \cdot \sigma_y$$



(a) 厚度变形 (b) 长度变形 (c) 面剪切变形 (d) 厚度剪切变形 (e) 体积变形

(3) 面剪切变形 (*FS (Face shear)*方式) :

$$q_x = d_{14} \cdot \tau_{yz} \quad (X\text{切晶体})$$

$$q_y = d_{25} \cdot \tau_{xy} \quad (Y\text{切晶体})$$

(4) 厚度剪切变形 (*TS (thickness shear)*方式) :

$$q_y = d_{26} \cdot \tau_{xy} \quad (Z\text{切晶体})$$

(5) 弯曲变形 (*BS (Bending shear)*方式)



2. 压电陶瓷的变形方式

(1) 厚度变形 (TE方式) : $Q=d_{33} \cdot F$

(2) 长度变形 (LE方式) :

$$Q=-d_{32} \cdot F \cdot S_X/S_Y=-d_{31} \cdot F \cdot S_X/S_Y$$

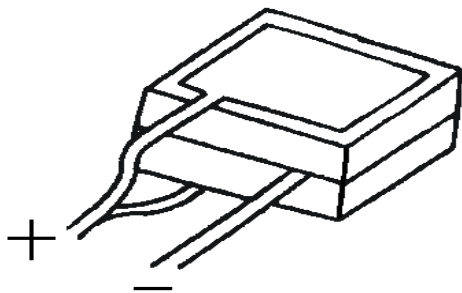
(3) 体积变形方式 (VE : *volume expansion*方式) :

$$q_x = d_{31} \cdot \sigma_x + d_{32} \cdot \sigma_y +$$

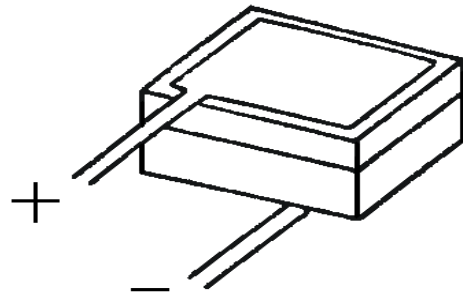
因为 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$, 且 $d_{31} = d_{32}$,

所以: $q_x = (2d_{31} + d_{33})\sigma$

5.3.2 压电元件的构造形式



(a) 压电晶片的并联



(b) 压电晶片的串联

并联: $C_{\text{并}} = 2C, U_{\text{并}} = U, Q_{\text{并}} = 2Q$

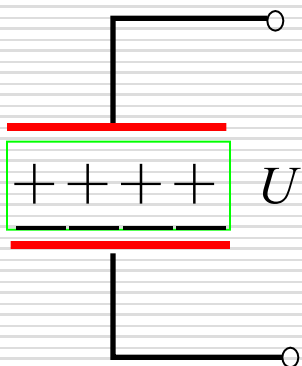
串联: $Q_{\text{串}} = Q, U_{\text{串}} = 2U, C_{\text{串}} = C/2$

在这两种接法中，并联接法输出电荷量大、本身电容大、时间常数大，合适用测量慢信号而且以电荷作为输出量的情况。而串联接法输出电压大、电容小，合适用于以电压作为输出信号、而且测量电路输入阻抗很高的场合。



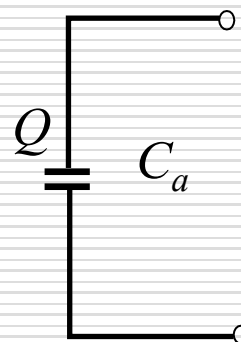
5.4 等效电路与测量电路

压电晶片受外力作用产生极化现象时，在它的两个极面上出现极性相反电量相等的电荷。所以压电传感器能够看作一种静电发生器。同步从构造上来看，可把它视为两极板上汇集异性电荷，中间为绝缘体的电容器。



电荷发生器

$$U = \frac{Q}{C_a}$$

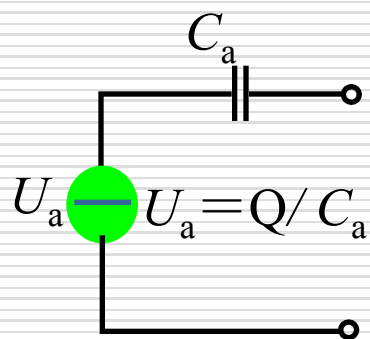


电容器

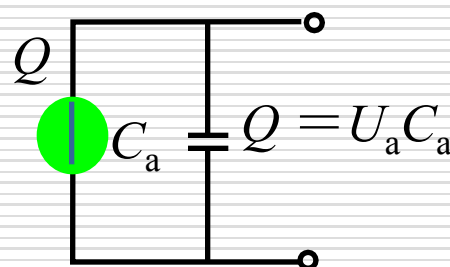
$$C_a = \frac{\epsilon S}{h} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{h}$$



传感器原理与应用



电压等效电路



电荷等效电路

所以，压电传感器可等效为电压源 U_a 和一种电容器 C_a 的串联电路；也可等效为一种电荷源 Q 和一种电容器 C_a 的并联电路。

传感器内部信号电荷无“漏损”，外电路负载无穷大时，压电传感器受力后产生的电压或电荷才干长久保存，不然电路将以某时间常数按指数规律放电。这对于静态标定以及低频准静态测量极为不利，必然带来误差。实际上，传感器内部不可能没有泄漏，外电路负载也不可能无穷大，只有外力以较高频率不断地作用，传感器的电荷才干得以补充，所以，压电晶体不适合于静态测量。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/698021135117006132>