

压敏电容器

T. H. 维尔皮茨卡娅 著

章 士 瀛 译

人民邮电出版社

苏联无线电
工业出版社

前 言

具有很高非直綫特性的压电陶瓷电容器叫做压敏电容器 (Вариконд)。压电体 (也叫鉄电体) 的介电常数决定于施加在它上面的电場强度, 因而呈现出非直綫性。对于制造压敏电容器所采用的材料的介电常数, 在比較弱的电場强度范围内 (約在150伏/毫米內) 将随着电場强度的增加而增大。当超过这个范围后則反而降低。最大的介电常数可能比它的起始值大 4—5 倍 (起始值在电場接近于零值时測量)。

利用压敏电容器介电常数随电場强度而变化的現象, 可以用压敏电容器代替电子管, 組成交流和直流介質放大器、倍頻器、稳压器、頻率調制器、脈冲振盪器、以及采用在无綫电技术、自动技术和遙控技术中的其他裝置。

众所周知, 电子管的工作寿命是有限的, 对过载、冲击和振动很敏感。因此在設备中采用电子管时, 会降低設备工作的可靠性。与电子管比較, 压敏电容器有比較高的机械强度, 能承受顛簸、振动和冲击。他們能工作在高湿度、低气压和高气压的情况下。它的使用寿命几乎是无限止的。除此之外, 压电陶瓷电容器的价格便宜, 結構簡單, 尺寸小, 因而便于組成小型設备。

同时, 压敏电容器也具有一系列的严重缺点: 介質損耗比較高; 許
变化。这些使得压敏

电容器的普及应用有困难。上述的以及某些其他的缺点，在今后压电体的研究中无疑会部分地或完全消除。与新的铁磁材料和半导体器件相配合，压敏电容器适于用在連續不断地長時間工作的設備中。

在苏联的书刊中，关于压敏电容器的闡述还很少，但是为了在各种技术范围内推广，使得广大的无綫电爱好者熟悉它的結構、工作原理、特性、設計特点和可能的用途是很有意义的。对这些問題加以簡要的闡述是这本小冊子的目的。

目 录

前 言

第 一 章 压电体的一般特性

第 二 章 压电材料

压电盐.....	(5)
钛酸钡.....	(9)
新的压电体.....	(13)
压电陶瓷的老化.....	(17)
BK—1 及压电体的非直线特性	(19)
在不同温度下BK—1 的非直线特性	(25)

第 三 章 压敏电容器

压敏电容器的主要类型.....	(29)
新结构的压敏电容器.....	(34)

第 四 章 压敏电容器的应用

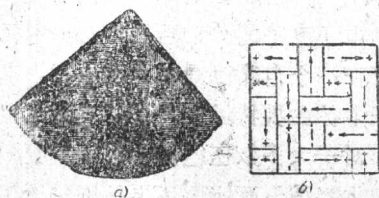
介质放大器.....	(39)
频率调制和控制振荡槽路的频率.....	(47)
倍频器.....	(49)
脉冲振荡器.....	(51)
交流稳压器.....	(51)
压敏电容器作为控制温度的感拾器.....	(52)

結束語

第一章 压电体的一般特性

压电体是一种特殊的电介质，它在低于某个温度时或在一定温度范围内，具有自发式电极化作用，即是不随外加电场而自发极化。在一系列的结晶固体介质内可发现压电特性。

在结晶体内具有的自发电矩①不呈现在结晶体外。因为一般结晶体是由许多单独的区域—电畴组成，电畴的极化有各个不同方向，因而整个的结



晶体不呈现电矩特性。图 1 (a) 钛酸钡单晶体 (b) 由于热运动而形成的电畴的排列情况
晶体的这种状态相当于能量的最低值最为稳定。图 1 示钛酸钡单晶体②的显微照象，它描述了电畴的结构，其形状为密织的区域，由于热运动的关系使它们排列成各电矩互相抵消的位置。

在特殊的条件下冷却结晶体使低于所谓居里点的某个温度，或者在外加电场的作用下，可以使整个结晶体呈现电矩。此时，结晶体将完全由一个电畴组成，它的自发电极化在整个结晶体的各部分将是同一个方向。但在这种情况下，晶体外面仍不呈现极化现象。因为，它被晶体表面上由空气中或由晶体

注1. 偶极子电矩：偶极子就是一对数值一样，符号相反的电 荷 $+Q$ 和 $-Q$ ，将电荷 Q 乘上电荷之间的距离的积叫偶极子电矩。电矩大小表现介质的极化程度。

注2. 单晶体是由人工培养出或存在于物质的自然状态下，有正确的结晶体的结构，但它不一定有结晶体的外型。与多晶体的不同在于多晶体是由许多单个单晶体在所有可能的方向固定排列，而单晶体有很高的均匀性和各向异性，也就是在各种不同方向上的性能不同。

内部沉积出的自由离子抵偿了。当加热或冷却晶体，或者在它上面加上电场时，可以使得自发电矩改变。改变电场强度和电场的方向，可以使已经极化了的电畴方向改变，因而使得体积和极化方向都发生变化。

现在认为，经过居里点而出现的压电特性，是由于晶体内部离子偏移使得晶格畸变而发生的偶极电矩所引起的。在电场的作用下，偶极矩的方向可能改变。

由于离子偏移，晶体的各单元网络变成许多电偶极子，它们在一个电畴范围内互相平行，电偶极子的平行排列就是决定压电体主要特性的自发电极化的原因。

对于大多数压电体有一个温度（居里点），高于它时自发电极化将消失而物质不再是压电体了。在压电盐内有两个居里点，在两个点之间的温度范围内呈现自发电极化现象。

压电体的特征表现在具有高的和超高的介电常数值以及与温度有强烈的依存关系，加在它上面的交流电场强度也影响这种关系。在弱电场范围内，靠近居里点时的介电常数达到最大值；而当温度降低或提高时会显著下降。当电场强度稍提高时，压电体的介电常数值很高，但是它与温度的关系很小。

压电体的极化效应的程度用单位体积内的电矩值来表示，这个值叫做介质的极化强度，用字母 P 表示。极化强度 P 与电场强度 E 的比值叫做介质的极化系数：
$$\alpha = \frac{P}{E}$$

相类似的值和比例关系对铁磁体也存在。

在一般的介质内， α 值与温度和电场强度的关系很小，因而对这些介质来说 P 值与 E 成比例，而 α 是它们之间的一个比例常数， $P = \alpha E$ 。

压电体与一般介质不同，甚至在自发电极化范围之外，就呈现出介电常数随温度而变化的特征。靠近居里点（或高于）

时，它近似于铁磁体的磁化系数与温度的关系（居点—維易斯定律），即在介質极化系数和温度差（ $T-\theta$ ）成反比例：

$$\chi(T-\theta) = \text{常数} \quad \text{式中：} T \text{—绝对温度；}$$

θ —居里温度；

χ —介質极化系数。

由此，对于压电体来说，介电常数 ϵ 实际上与 χ 成比例，居里—維易斯定律对压电体可表示如下式： $\epsilon(T-\theta) = \text{常数}$ 。

当经过居里点时，压电体的一系列特性如：热容量、晶格的结构、物質的折光指数和其他一些特性，都发生突变。

压电体在压电范围内的自发电极化是与电致伸缩^①变形伸随而产生的。

近来压电体的非直线特性引起了很大的兴趣。所谓非直线性是指在压电范围内，介質的极化强度 p 和介电常数 ϵ 是电场强度的非直线性函数这一事实。

介質极化系数在任何时候都与介質常数有关，一般的关系为： $\epsilon = 1 + 4\pi\chi$ 。

在压电体内，介电常数可达几千几万，因而对它来讲可以写成： $\epsilon \approx 4\pi\chi$ 。此时 $P \approx \frac{\epsilon}{4\pi} E$ 。

对所有的压电体已证明，当提高交流电场强度时，开始时介电常数都增大，但是达最大值后若再继续提高电场强度时就反而下降。 $\epsilon = f(E)$ 曲线的斜率，在弱电场范围内和在最大值范围内的介电常数值，以及在其作用下 ϵ 能达到最大值的电场强度，全决定于压电体的组成和结构。

压电体在电场内的现象与磁场内的铁磁体有许多相似，介电常数与电场强度变化的特性近似于导磁常数与磁场强度变化特性。在电场的作用下，在压电体内发生饱和滞后现象，与磁

注1. 电致伸缩是指在电极化下电介質几何尺寸改变的现象。

性材料在磁場的作用下的磁滯情況一樣。

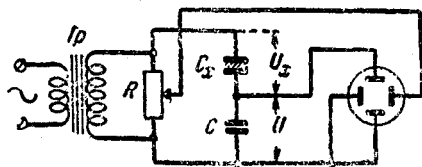


图 2 研究电容器充电与电压关系的线路。

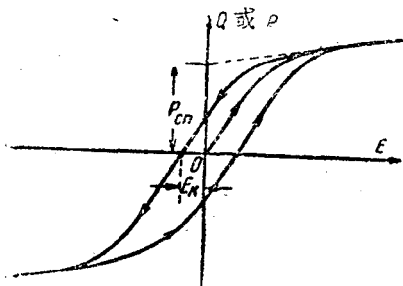


图 3 压电体的滞后回线。

波器的线路。这个线路一般由频率为50赫的电源经降压变压器 \$Tp\$ 供给，电位器 \$R\$ 是为了调整示波器水平偏向屏的电压而设的。

电子束的水平偏向与施加在被试验的电容器 \$C_x\$ 上的电压成比例，垂直偏向与辅助电容器 \$C\$ 上的电压成比例，而 \$C\$ 与电容器 \$C_x\$ 相串联。由于串联的电容器的电荷任何时候都是相等的，因而， $UC = U_x C_x$ ，由此 $U = \frac{U_x C_x}{C} = \frac{Q_x}{C}$ 。

这样一来，电子束的垂直偏向与电容器 \$C_x\$ 的电荷成比例，交流电压改变一整周，电子束在光屏上给出的电容器电荷与电场强度的关系曲线 $Q = f(E)$ ，近似于磁滞回线（图 3），根据滞后回线的宽度可以估计电容器内的损耗。

压电体的极化强度与电场强度的关系曲线和铁磁体的磁感应强度与磁场强度的关系曲线有相同的性质，不能近似的用直线来代替。当提高电场强度时，压电体电容器极板上的电荷也增多，而后达到饱和状态。

研究压电电容器极板上的电荷与电场强度的关系，可借助于图 2 所示的利用示

为了分析带有非线性元件电路的工作和决定它的应用范围，可以利用与供计算带有磁性元件电路相似的方法，将非线性电容器的电荷与电场强度的关系近似地表示成各种函数。更准确些，将这个关系曲线表示成为双曲线正弦函数。

由这种关系曲线，列出采用在具体线路中的电流方程式，并解这个方程式，找出在这线路中利用非线性器件的最好工作状态。

虽然压电体和磁性材料的非直线特性所决定的物理过程各不相同，但他们之间的类似点使我们能更好地来研究压电体。

实际上应用非线性压电体的无线电设备，只是当研制出具有显著非直线特性的压电陶瓷材料之后才变成可能。例如用压电陶瓷做成压电电容器——《压敏电容器》。

第二章 压电材料

压电盐

自发电极化现象在发现压电盐后 30 年才发现的，以及对具有类似特性的介质在苏联被命名为《压电体》（Сегнетоэлектрики），在外国文献中，由于这类物质是和铁磁体的特性类似，所以一般称为铁电体（Ферроэлектрики），这并不是说它的组成中有铁的成分。

所有的已知压电体中，按照它产生自发电极化的过程可以分成两个主要类别：

第一类物质的组成含有氢（质子压电体），属于这一类的有压电盐（罗氏盐）和它的同族混合结晶体以及其他化学物质。

属于第二类的包括钛酸钡，按结构与它同类的一大组材料，以及与钛酸钡混合的其他化合物。

压电盐的反常特性在1918年有恩捷尔逊发现的，而后又有瓦拉舍克和其他人也相继发现，在30年代H·B·库耳卡托夫和П·П·科别科详细地实验研究了这些特性。他们第一次给了这些物质的介电性能以理论的解释，在压电性能的实验过程中发现了一系列与压电盐同族的混合结晶体。

压电盐由酒石酸中得到，它是带有四个离子结晶水的酒石酸二钠钾盐，它的压电特性可以解释为在它里面存在着由氢和氧组成的偶极子。

压电盐的结晶格含有氢的正离子和氧的负离子，位于互相不对称的位置而组成偶极子。偶极子互相作用的能量足够使得它在某一微小的区域（电畴）内保持着一个方向。

基于这个概念的理论，与测量得出的结晶体极化强度和温度的关系，以及 ϵ 与温度的关系，在数量上很吻合：当提高频率至 5×10^8 赫时 ϵ 显著下降是这个理论的证明。

当温度提高至 55°C 时，压电盐分解，部分（在 58°C 时完全溶解）溶于分解出的结晶水内。这个过程称谓压电盐结晶体的《溶化》，而且是不可逆的。除此之外，压电盐的结晶体在不高的温度下就可能开裂。

压电盐能溶于水，因而它的结晶体可以用水潮湿了的细线切成薄片，而后研磨任何一个潮湿了的表面。

压电盐的结晶体很容易在铣床上用高速切削法作机械加工，或用带锯锯开。

在压电盐内有明显的各向异性，仅仅是沿着结晶体的一个轴时才呈现压电特性、自发电极化、特高的介电常数并与温度和电场强度有灵敏的关系，以及滞后现象和其他特别的性能。

沿結晶体的其他两个軸的介电常数的值約10—12，并与电場强度无关。

压电盐特有两个居里点（ 22.5°C 和 -15°C ），在居里点时 ϵ 达最大值。当弱电場下，在高温和低温的居里点时，介电常数可达4000和6000（图4）。

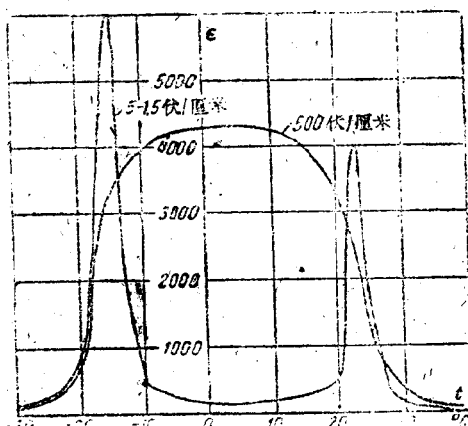


图4 在不同的交变电場强度下压电盐的介电常数与温度的关系。

由图4看出，介电常数的温度关系曲线与电場强度有关。

在电場强度为500伏/厘米时，在高温和低温居里点之间的整个温度范围内，介电常数值約有4000，而在这个温度范围之外，它减小到只几个单位（当温度为 -157°C 时 $\epsilon = 7$ ），并且变化很小。

居里点受机械压缩和流体静力学的压力而变化，后者能提高两居里点的温度，并增大它们之间的范围。

压电盐的电气强度在空气中可能有极其不同的数值，例如在結晶体内如果有不大的裂纹，也将大大增加被击穿的危险性，在油中，在高的流体静力学的压力下，压电盐的电气强度

等于600千伏/厘米。

在技术设备中利用压电盐时，或在检定它的好坏时，一般要符合下面一些要求：結晶体必須純洁而有光滑的表面；均匀而完全明亮，即不含有其他的杂质和在一定的方向有同样的折光指数。它必須与电极有坚固的接触，但同时不允許电极或夹头造成机械应力。

压电盐的介电常数与頻率有关，頻率一高它就开始慢慢下降，而当頻率為108—109赫时銳減至几十。

現在由所有已知的压电体中，压电盐的极化强度和介电常数与电場强度（在弱电場范围内）的关系是最銳敏的。

压电盐的介質滯后現象与溫度有关，最寬的滯后回綫是靠近 0°C ，而接近居里点时，它逐漸变小。

高于 $+32^{\circ}\text{C}$ 和低于 -26°C 时，介質滯后現象將消失，而极化强度与电場强度成比例关系。

压电盐的自发电极化强度随溫度而变化，靠近 3°C 时达最大值等于740 CGSE。

极化强度与电場强度的关系曲綫 $P=f(E)$ 一般按示波分析的数据組成，类似于图3的曲綫。

在这个关系曲綫內有三个区域，第一是在弱电場下，极化强度直綫上升，在第二个区域内，随电場强度增大，极化强度很快上升，对压电盐計直到达于150—200伏/厘米为止，而后在电場强度为250—300伏/厘米的电場內开始出现明显的飽和現象。

压电盐的介电常数在电場强度約100伏/厘米下达最大值 $\epsilon_{\text{max}} = 20000$ ，而后逐漸降低，当电場强度約1000伏/厘米时減小至起始的数值。

压电盐与它的同晶物质的混合物仍是压电体，虽然，这种

同晶物質按組成和結晶結構來看與壓電體相似，但不具有壓電特性（例如：鈉胺和其他鹽類）。隨壓電鹽在混合物中的比例減小，混合物的介電常數會顯著降低，而居里點亦向更低溫度區移動。這種混合物的物理化學性質與壓電鹽的性質差別不大。

在很弱的電場範圍內，當電場強度提高時，介電常數顯著增加，但繼續提高時則反而下降，即具有高的非直綫性。這是當利用它作為非直綫性器件時壓電鹽比其他壓電體优越的地方。但是壓電鹽的非直綫特性僅僅在高溫和低溫居里點（從 -15°C 至 $+22.5^{\circ}\text{C}$ ）之間比較窄的溫度範圍內才能保持。壓電鹽的機械強度很差，且分解溫度低（ 55°C ）。除此之外，它的非直綫特性與作用在結晶體上的不大的機械力有銳敏的關係。後者大大地限制了利用它作為製造各種無線電技術和電工設備的非綫性器件材料的可能性。

在1935—1938年之間在亞磷酸鉀和碲酸鉀內發現了壓電特性，由於它的壓電特性僅僅在極負的溫度下才出現，所以在實際技術領域中沒有採用。

鈦 酸 鋇

蘇聯學者B·M·伍爾和D·M·考立特曼在1944年發現並全面地研究了鈦酸鋇的壓電特性。這個發現使得得到了新的陶瓷壓電體。這個新物質具有特別簡單而牢固的結晶結構。他的特點是與含有氫離子沒有關係。鈦酸鋇的一些特性開始時是在用陶瓷工藝的方法，由工業材料制成的多晶體的樣品中發現的，但以後制出的鈦酸鋇的单晶體也有類似的特性。

鈦酸鋇的特性可以用下列幾項來說明：介電常數與溫度的關係；居里點（ $+120^{\circ}\text{C}$ ），介質滯後現象和介電常數隨電場強度的變化關係。

曾指出过当加热时钛酸钡的结构会改变，后来这点也完全证实了。

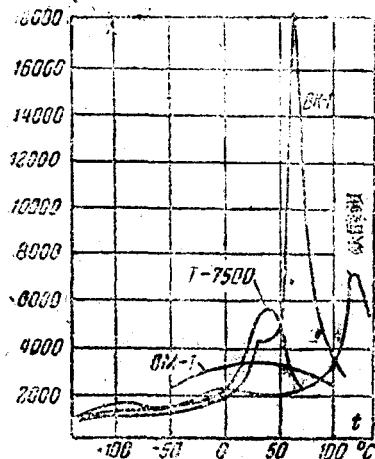


图 5 在弱电场范围内测量的钛酸钡，材料 T-7500, CM-1 和 BK-1 的介电常数的温度变化关系。

不论多晶体或单晶体的钛酸钡，当温度变化时，它的介电常数有三个最大值。钛酸钡的介电常数主要最大值（居里点）的温度等于 120°C 。高于这个温度，介电常数的温度系数变成负的，且越近于居里点越大。 $\epsilon = f(t)$ 的关系曲线服从居里—维易斯定律。

在低于居里点的温度范围内，介电常数减小，其中经过两个不大的最大值，与它们相应的温度约为 0°C 和 -80°C （图 5）。这两个最大值象第一个主要最大值一样，决定于由于结晶结构的改变而改变的自发电矩的方向和大小。当从 -80°C 继续降低温度时，介电常数仍减小。

在介质损耗角正切值 ($\text{tg}\delta$) 的温度关系内同样发现有三个最大值，而且靠近居里点时的最大值比其他两个温度下的最大值变化比较平坦。 $\text{tg}\delta$ 的最大值比 ϵ 的最大值偏左，并出现在相应于介电常数上升陡峭的温度下。

当提高电场强度时， ϵ 和 $\text{tg}\delta$ 都显著增加，它们的温度关系曲线中两个低的 ϵ 和 $\text{tg}\delta$ 的最大值变得很显著。

钛酸钡的介电常数 ϵ 与频率有关，在室温和低电场强度

下，頻率由50赫提高到 10^7 赫时， ϵ 慢慢降低 10—15%，而后当頻率高到 10^9 — 10^{10} 赫时，发现 ϵ 銳減至几百。

在无綫电頻率范围内，介質損耗角的正切值随頻率提高而开始慢慢增加，而后增加很快，当頻率为 10^9 — 10^{10} 赫时，它变得很大，等于几兆赫时的几十倍。在 1 兆赫时的 $\text{tg}\delta$ 值约为 0.01—0.02。

介电常数与溫度的特殊关系能保持至超高频，在居里点上 ϵ 达最大值，約等于几千。这就証明鈦酸鋇的压电特性能保持在超高频的范围内。

在鈦酸鋇电容器内发现有电荷与电场强度的非直綫性关系，在 8—10 千伏/厘米时达到飽和状态。由极化强度 P 和电场强度 E 的关系曲线可确定压电体的一系列特性。假若延长滞后回綫的飽和綫与纵坐标軸相交，如图 3 所示，則得到自发极化强度 P_{cn} ，滞后回綫与横坐标軸相截的一段叫做驟頑电场强度 E_r 。

鈦酸鋇的自发电极化强度与溫度有关，靠近居里点时它显著降低，在 120°C 时变成零。在室温下这个极化强度值約等于 12—16 微庫倫/厘米²，比压电盐的最大自发电极化强度（0.26 微庫倫/厘米²）大很多倍。

鈦酸鋇的介电常数和 $\text{tg}\delta$ 与交变电场强度有关，在弱电场内（小于 100 伏/厘米），这个关系接近于直綫关系，而后 ϵ 和 $\text{tg}\delta$ 都上升很多。

当电场强度为 6—8 千伏/厘米时，介电常数达最大值，等于 6000—8000，而后下降。 $\text{tg}\delta$ 的最大值出现在 ϵ 最大值的左边一些，就是在比較弱的电场范围内。这个 $\text{tg}\delta$ 的最大值相应出现于 ϵ 增长最陡峭的区域内。

在負溫度的情况下，非綫性特性关系 $\epsilon = f(E_r)$ 和 $\text{tg}\delta =$

$f(E_0)$ 的斜度比在室溫下要高。在低電場強度下靠近第二和第三個低溫最大值的 ϵ 飽和值比在 20°C 下出現得早。

不論是在正溫達 120°C 或是在負溫達 -195°C 時都呈現出高的介電常數值，且它的滯後回綫和 ϵ 隨電場強度而變化，由此看出鈦酸鋇在寬廣的溫度範圍內都是壓電體，這就是它比壓電鹽優勝的地方。

鈦酸鋇象其他具有高介電常數的結晶體一樣，有鈣鈦礦型的結晶格。

理想的鈣鈦礦型的正立方晶格示于圖6a，鋇（鋇或鈣）離子位于正立方的中心，鈦離子在正立方體的八角上，氧離子位于菱形八面體①的角上。每一個鈦離子被六個氧離子圍着，并位于它們的中心。鋇離子（鋇和鈣）周圍有八個鈦離子，同時有八個氧離子的菱形八面體。

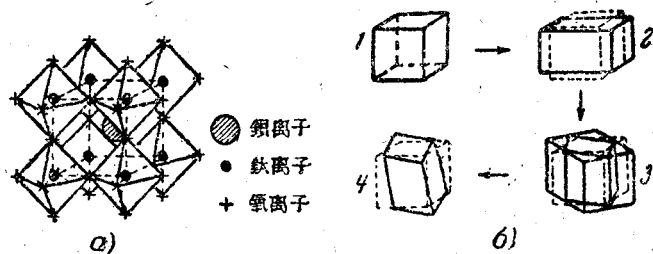


圖 6. a) 理想的鈣鈦礦型的正立方結構；b) 鈦酸鋇結晶結構的溫度變化

1. 當溫度高于居里點(120°C)時的正立方晶格；
2. 在 $5^\circ\text{C} < t < 120^\circ\text{C}$ 下的矩形立方體晶格；
3. 在 $-70^\circ\text{C} < t < 5^\circ\text{C}$ 下单斜晶格；
4. 在 $t < -70^\circ\text{C}$ 下斜方六面體晶格

三種鈦酸鹽（鋇、鋇、鈣）之中，僅鈦酸鋇在正溫（小于 120°C ）下是壓電體，這是由于它的特別的結構。

註1. 菱形八面體——有八個面的幾何體，它能夠用兩個四面形的稜錐體將底互相貼合而得到。

B. M. 伍尔指出，只有在鈦酸鋇內，鈦离子和氧离子之間的距离大于它們半徑的和，因此鋇离子能够由自己的中心位置（或相对称的位置）偏移，而与一个或二个氧离子組成偶极子。偶极子电矩的总和就組成自发电极化强度。但在室溫下，鈦酸鈣或鈦酸鋁中鈦离子和氧离子之間的距离小于它們半徑的总和，鈦离子不可能发生偏移，因之这两种化合物就不是压电体（原文可能有誤，鈦酸鋁是一种压电体——譯者註）。

鈦酸鋇随溫度变化在 120°C ，約 5°C 和在 -70°C 下改变自己的結構，如图65所示，高于居里点，它有正立方形的晶格，不具有压电特性，在 120°C 时轉變成矩形立方体晶格（一个軸仅仅比其他两个軸长1%），在 0°C 以下时又变成单斜晶格，而在 -80°C 时，成为斜方六面体的晶格，后三种晶格时都是压电体。

它由一个結構轉變成另一結構的同时，自发电极化强度、线膨胀系数、热容量、折光指数和介电常数等都发生变化，而后者变化特別显著。

根据得到的条件，多晶体的鈦酸鋇在室溫下可能有不同的結晶結構，仅仅当它的結晶为鈣鈦矿型的矩形立方体晶格时，它才是压电体。

新的压电体

除鈦酸鋇外，其他很多材料是压电体，例如P. H. 斯摩列斯基发现鋇酸鉛、鈦酸鉛、鈦酸鋁、鋁酸鋁、鋁酸鉛、三氧化錫等都具有压电特性。

这些物質的結晶构造不同，其中許多种象鈦酸鋇一样，有鈣鈦矿型的結構，也有其他的結構。同样也可将鈦酸鋇（或其他压电体）与一些組成和結構与它相近的物質相混合（这些物