

电子学研究所

75-05016

强介陶瓷电容器

Д. М. 卡扎尔诺夫斯基著

李均报译

章士瀛校



內 容 簡 介

本書簡述了强性陶瓷的結構与極化的物理概念，并介紹强介电容器的結構、計算、制造工艺和試驗方法的基本知識。

本書供有关工程师、設計師、实驗室工作人員在制造和在电工技术与无綫电技术装置中，应用强介电容器时参考。

有关專業的高年級大学生亦可用做参考書。

苏联 Д. М. Казарновский 著 ‘Сегнетокерамические конденсаторы’ (Госэнергоиздат 1956 年第一版)

*

國防·工業出版社

北京市書刊出版业營業許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{25}$ 印張 8 $\frac{7}{25}$ 166 千字

1959 年 5 月第一版

1959 年 5 月第一次印刷

印数：0,001— 5,100 册 定价：(11) 1.35 元

NO. 2884

目 次

前言	5
緒論	7
第一章 强介电容器的一般性能	16
1. 电介質的滞后現象	16
2. 电容	18
3. 电容器的非直綫性	22
4. 无功功率和电容器的品質因數	25
5. 压电效应	29
6. 电容器的絕緣电阻	33
7. 电容器的絕緣强度	35
8. 电容器参数的变化	37
第二章 在陶瓷材料內的强电現象	40
9. 鈦酸鋇的自發極化	40
10. 其他几种陶瓷材料的自發極化	47
11. 强性陶瓷內的自發電致伸縮	50
12. 在电場中的强性陶瓷	52
第三章 具有强电性能的陶瓷材料	57
13. 鈦酸鋇	58
14. 鈦酸鉛	71
15. 鋳酸鋇	73
16. 鋳酸鋇溶于鋳酸鉛內的固态溶液	78
17. 鈦酸鈣溶于鈦酸鉛內的固态溶液	79
18. 鈦酸鋇溶于鈦酸鉛內的固态溶液	79
19. 錫酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	80
20. 鋳酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	83
21. 鈦酸鉛溶于鈦酸鋇內的固态溶液	87
22. 鈦酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	90
23. 鈦酸鈣溶于鈦酸鋇內的固态溶液	93
24. 鈦酸鋇、鋳酸鋇、鈦酸鉛和鋳酸鉛相互生成的固态溶液	94
25. 鈦酸鈣和鈦酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	96

第四章 强介电容器的設計原理和結構	99
26. 与强性陶瓷絕緣强度相适应的电容器电压	99
27. 与發热条件相适应的电容器电压	103
28. 与要求的强电性能相适应的电容器电压	110
29. 电容器的电容和損耗	112
30. 电容器的非直綫性	119
31. 單層型电容器	121
32. 組合型电容器	122
33. 抗干扰电容器	126
34. 横电場飽和的强介电容器	131
第五章 强介电容器的制造	136
35. 陶瓷电容器生产的一般工艺	136
36. 强性陶瓷制造过程的基本特征	142
37. 薄片平板形电容器的制造	147
38. 管形电容器的制造	153
39. 鼓形电容器的制造	153
第六章 具有强的和弱的非直綫性的标准强介电容器	156
40. 非直綫性弱的电容器的材料	156
41. 盘形和管形电容器	161
42. 多層組合电容器	166
43. 小型电容器	167
44. 鼓形电容器	169
45. 非直綫性电容器	173
第七章 强介电容器的电气試驗	180
46. 直流电压下电容器的电容	180
47. 交流电压下电容器的电容和品質因数	182
48. 在交流和直流电压下电容器的电容量	193
49. 电容器的电流和电压曲綫	195
50. 电容器的压电特性	196
51. 电容器的絕緣强度	201
52. 电容器的絕緣电阻	206
53. 电容器的可逆不穩定性和老化	207
参考文献	210

强介陶瓷电容器

Д. М. 卡扎尔诺夫斯基著

李均报译

章士瀛校



中国科学院图书馆藏

內 容 簡 介

本書簡述了强性陶瓷的結構与極化的物理概念，并介紹强介电容器的結構、計算、制造工艺和試驗方法的基本知識。

本書供有关工程师、設計師、实驗室工作人員在制造和在电工技术与无綫电技术装置中，应用强介电容器时参考。

有关專業的高年級大学生亦可用做参考書。

苏联 Д. М. Казарновский 著 ‘Сегнетокерамические конденсаторы’ (Госэнергоиздат 1956 年第一版)

*

國防·工業出版社

北京市書刊出版业營業許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{25}$ 印張 8 $\frac{7}{25}$ 166 千字

1959 年 5 月第一版

1959 年 5 月第一次印刷

印数：0,001— 5,100 册 定价：(11) 1.35 元

NO. 2884

目 次

前言	5
緒論	7
第一章 强介电容器的一般性能	16
1. 电介質的滞后現象	16
2. 电容	18
3. 电容器的非直綫性	22
4. 无功功率和电容器的品質因數	25
5. 压电效应	29
6. 电容器的絕緣电阻	33
7. 电容器的絕緣强度	35
8. 电容器参数的变化	37
第二章 在陶瓷材料內的强电現象	40
9. 鈦酸鋇的自發極化	40
10. 其他几种陶瓷材料的自發極化	47
11. 强性陶瓷內的自發電致伸縮	50
12. 在电場中的强性陶瓷	52
第三章 具有强电性能的陶瓷材料	57
13. 鈦酸鋇	58
14. 鈦酸鉛	71
15. 鋳酸鋇	73
16. 鋳酸鋇溶于鋳酸鉛內的固态溶液	78
17. 鈦酸鈣溶于鈦酸鉛內的固态溶液	79
18. 鈦酸鋇溶于鈦酸鉛內的固态溶液	79
19. 錫酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	80
20. 鋳酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	83
21. 鈦酸鉛溶于鈦酸鋇內的固态溶液	87
22. 鈦酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	90
23. 鈦酸鈣溶于鈦酸鋇內的固态溶液	93
24. 鈦酸鋇、鋳酸鋇、鈦酸鉛和鋳酸鉛相互生成的固态溶液	94
25. 鈦酸鈣和鈦酸鋇溶于鈦酸鋇內的固态溶液	96

第四章 强介电容器的設計原理和結構	99
26. 与强性陶瓷絕緣强度相适应的电容器电压	99
27. 与發热条件相适应的电容器电压	103
28. 与要求的强电性能相适应的电容器电压	110
29. 电容器的电容和損耗	112
30. 电容器的非直綫性	119
31. 單層型电容器	121
32. 組合型电容器	122
33. 抗干扰电容器	126
34. 横电場飽和的强介电容器	131
第五章 强介电容器的制造	136
35. 陶瓷电容器生产的一般工艺	136
36. 强性陶瓷制造过程的基本特征	142
37. 薄片平板形电容器的制造	147
38. 管形电容器的制造	153
39. 鼓形电容器的制造	153
第六章 具有强的和弱的非直綫性的标准强介电容器	156
40. 非直綫性弱的电容器的材料	156
41. 盘形和管形电容器	161
42. 多層組合电容器	166
43. 小型电容器	167
44. 鼓形电容器	169
45. 非直綫性电容器	173
第七章 强介电容器的电气試驗	180
46. 直流电压下电容器的电容	180
47. 交流电压下电容器的电容和品質因数	182
48. 在交流和直流电压下电容器的电容量	193
49. 电容器的电流和电压曲綫	195
50. 电容器的压电特性	196
51. 电容器的絕緣强度	201
52. 电容器的絕緣电阻	206
53. 电容器的可逆不穩定性和老化	207
参考文献	210

前 言

介質常数奇高，并且具有非直綫性介質性能的陶瓷材料——鈦酸鋇的發現，为新型陶瓷电容器——强介电容器的发展奠定了基础。紧跟着鈦酸鋇的發現，相繼又發現和研究了性能类似鈦酸鋇的其他陶瓷材料。同时并制造了各种用途的强介电容器，其中包括放大器、倍頻器以及其他类型装置用的电容器。

虽然，有关鈦酸鋇和其他陶瓷强电体的著作很多，但是在强介电容器方面所获得的结果仍还不够系統化。尽管現在有很多的科学工作者，工程师都已在他們的研究工作中采用强介电容器，但是在一些書籍中目前还没有詳尽的闡明强性陶瓷的技术种类、电气性能以及强介电容器的結構、計算和試驗等一系列的問題。因此可以期望提供讀者参閱的本書能够在某些程度上弥补这方面的缺陷，并且也可作为一本基础書籍，有助于讀者更深入地研究强介电容器和它在技术中的应用。

现在，强介电容器的生产規模还不大；一方面固然是由于强性陶瓷的性能在很多方面需要进一步的改善，但另一方面似乎也是由于研究电工及无綫电技术设备的設計师、工程师对新型电容器抱着审慎的态度而引起的。应当認為，对强介电容器的主要性能及其特点加以闡述，将有助于在設備和仪器中广泛地运用这种电容器，因而也将促进强介电容器的进一步的改善和生产的扩大。这样在国民經济中日益增長地应用强性陶瓷的进程将更为加速。

新的研究和技術上的新成就不断地充实着强性陶瓷材料的領域。遺憾的是最近發表的一些著作和論文未能在 1955 年准备出版本書的手稿中加以闡述；其中很多在参考文献的目录中作了补充索引。

作者对 B. T. 列恩聶和 Г. А. 斯摩列恩斯基表示感謝，感謝他

6
們在審查手稿時給予了寶貴的指示和建議，同時作者對自己的同事們和同志們所給予的經常的幫助也表示謝忱。

有關本書可能存在缺點的意見，請依照下列地址徑寄作者。

Ленгосэнергоиздат

地址：Ленинград，Марсово поле，1.

作者

緒 論

电路的非直綫性元件与直綫性元件之不同，在于前者在电流或电压变化时，其参数不是常数。具有这种元件的电路，称为非直綫性电路，因为这种电路中的变化过程，可以用非直綫性微分方程式表示。电路之电阻、电感和电容元件及組合元件，均能具有非直綫性的特性。在一定的条件下，由强电体制成的电容器，就是电路的非直綫性电容元件。强电体是一种（在一定的温度，频率和电场强度下）具有奇特的介电特性的材料。在强电体中电场周期性变化时，电位移的瞬时值 $D_{\text{瞬时}}$ 和电场强度的瞬时值 $E_{\text{瞬时}}$ 的关系可用类似于铁磁性材料的磁滞迴綫来表示；在强介电容器上的电荷 q 与端电压 u 的关系（ q 和 u 为瞬时值）曲綫也具有相似的形状。电容器上电荷的变化落后于电压周期性变化的这种现象称为电介質滞后。强电体的介質常数随着交变电场强度的变化而改变；如果在弱交变电场中，加上直流电场，測量介質常数，則可發現介質常数与直流电场强度的关系。

强电体的介質常数，随着温度的变化往往改变得非常剧烈，其温度关系曲綫还具有一最大值。

在一定的温度与电场强度下，强电体的介質常数可以高达几千几万。当频率改变时，在介質常数的温度曲綫上的最大值并不改变，它仍旧在原来的温度上出現。

电介質滞后和介質常数与电场强度的关系只在某一温度范围內發現。因而强电体具有临界温度，超出此温度时其特殊的性能将会消失。强电体在这一温度下，發生了結構的变化，此温度就是所謂居里点或晶相轉变点。强电体的介質常数在弱电场中在居里点上达到最大值。应当注意，强性盐內有两个居里点，上述的特性只在两点間的温度范围之內發現。在一定的条件下，强电体

也具有压电的性能。

应该指出，当频率特别高时，强电体的上述性能将要消失，对于陶瓷强电体，频率的上限约为 10^8 赫芝。

强电体的上述特性，首先决定着这类材料的所谓强电性能，但是，应当指出，仅以这些特性来鉴定强电体，还是不够全面的。强电体的电气性能和它在电场中的动态与铁磁性材料的特点在表面上有相似的地方。所以在外国的书籍里，有时将强电体称为铁电体，但是更确切的称法应为我们所惯称的强电体。因为这些材料内不含铁。强电性与铁磁性之间有很大的区别，物质的铁磁性与电子本身的磁矩有关，磁矩在高于居里点的时候仍然存在。强电性与离子的组合电矩有关，而这些离子在结晶格内以一定形式排列，并在一定的区域范围内组成最大的总的电矩。高于某一温度（居里点）时晶格的结构将具有其他特征，此时电矩将会消失。强电体的命名，与另一种物质——强性盐的命名有着密切的关系。强性盐 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 是我们最早发现具有上述强电特性的一种物质。强性盐发现于 1672 年，并开始用于医学。1880 年 П. Ж. 居里兄弟二人在酒石酸钾钠盐中发现了压电效应。

1894 年在晶体“a”轴方向上确定了强性盐介电常数的反常现象。在当时研究压电学的俄国科学家中应指出的有：Б. 科列恩科 [参考文献 2]，Г. 奥尔夫和 Н. 安德列夫。经过 И. 瓦拉舍科 (Валашек) 和其他科学家的研究 (1915~1924)，强性盐才开始得到较大的重视，强性盐的一些主要性能（滞后现象、居里点和很高的介电常数等等）也是在这个时期确定的。在深入研究和在理论阐述强电体的反常性能方面，苏联科学家 И. В. 库里卡脱夫，П. П. 科别科和他的同事们，以及 Р. 蜀尔娃斯-索洛基娜的著作都起了卓越的作用。

强性盐——酒石酸钾钠盐是斜方晶系的晶体。如图 1 所示，截面为十角形状，晶格常数之间的比例如下：

$$a:b:c=0.8317:1:0.4296。$$

强性盐的比重为 1.767 克/公分^3 ，加热时晶体很容易裂开，在温度为 $+50^\circ\text{C}$ 时，晶体便分解。强性盐非常脆，易溶于水，强性盐的晶体是显著的各向异性体，仅沿着结晶轴“ a ”时，晶体才具有强电性能，结晶轴“ a ”被称为强电轴。只有当电场顺着此轴或者电场的分量沿着此轴时，才发现介质滞后，很高的介质常数，以及介质常数随温度、电场梯度和频率的尖锐的变化关系。强性盐在 b 和 c 轴方向的性能，与接近于它的一些结晶物质的性能无显著的差别。

将强性盐置于弱电场中，在频率不高、温度范围为 $-18 \sim +22.5^\circ\text{C}$ 时，它所具有的性能对于技术使用来说是最有意义的。对于自由晶体来说，在频率为 50 赫芝并放在弱电场 ($E < 60 \text{ 伏/公分}$) 中时，强性盐晶体的介质常数的温度曲线，有两个最大值 [参考文献 3] [图 2]。

当以重氙代替晶格中的氙时 (重氙是氙的同位素，原子量等于 2)，强性盐的性能，发生了很大的变化。温度远远低于 -18°C 或显著地高于 $+22.5^\circ\text{C}$ 时，高的介质常数和非常非线性介质的性能仍然存在。因此对于这种物质，强电性的区域不限制在 $-18 \sim +22.5^\circ\text{C}$ 的范围内，而占据着更宽的范围。介质常数与电场强度的关系，在弱电场中，只有频率不大于 5000 赫芝 (图 26) 时，才可能发现。当电场强度 E 由 100 增至 400 伏/公分时 (频率为 50 赫芝)，介质常数由 $\epsilon = 1770$ 增到 $\epsilon = 2330$ ，然后显著地跌落，当电场强度为 $E = 16.5 \text{ 仟伏/公分}$ 时，而介质常数下降为 $\epsilon \approx 200$ 。应注意到，在强交变电场中，由于强性盐的损耗特别大，要测定介质常数是极其困难的。在高频下，介质常数也急剧下降 (图 3)；频率为 $10^6 \sim 10^9$ 赫芝时， $\epsilon \approx 100$ ；频率为 $9.5 \cdot 10^{10}$ 赫芝时 $\epsilon = 8$ 。在空气中试验时，强性盐的绝缘强度是很低的。强性盐在

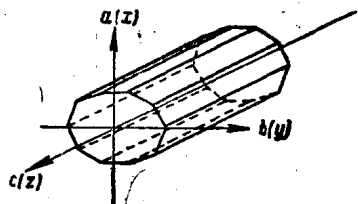
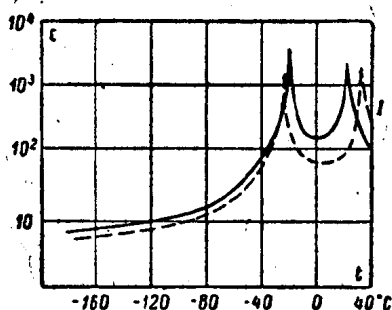


图1 强性盐的晶体， a 、 b 、 c ——结晶轴。

a)



b)

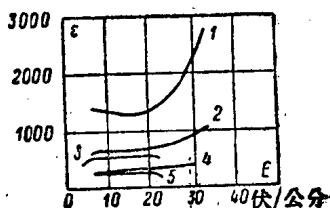
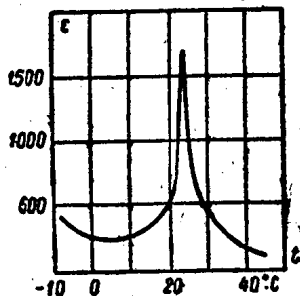


圖2 强性盐 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 的介質常数与温度
(a)、电场强度 (b) 的关系。

频率 f 赫芝: 10^3 , $5 \cdot 10^3$, 10^4 , $5 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^5$ 曲线 1, 2, 3, 4, 5 (曲线1——用重氘代替了氢的强性盐 $\text{NaKC}_4\text{H}_2\text{D}_2\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 在弱电场中和频率50赫芝时)。

a)



b)

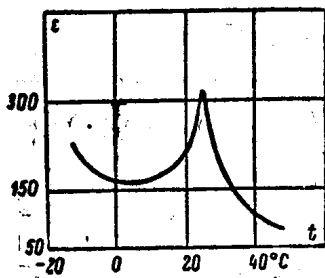


圖3 在弱电场中 ($E < 60$ 伏/公分); 频率为 $8 \cdot 10^4$ 赫芝时,
酒石酸鉀鈉盐介質常数与温度的关系:

a) 自由晶体; b) 夹紧晶体。

空气中产生击穿时的电场强度, 比空气的击穿强度低的很多, 这可能是因为强性盐的表面上产生了表面放电的缘故。在不均匀的电场里, 如在变压器油(尖端-平面)中进行试验时, 厚度为3公厘的试样在直流电压下的击穿电场强度不超过30~50千伏/公分, 在交流电压下则不超过30~40千伏/公分, 如试样的厚度为1公厘,

則击穿電場強度為 90~100 與 60~70 仟伏/公分。在很均勻的電場中（試樣帶凹穴），放在變壓器油里，加直流電壓，其击穿電場強度約為 120 仟伏/公分（試樣厚度為 1 公厘）。強性鹽中的損耗以 $\text{tg } \delta$ 表示，電場強度 $E = 105$ 伏/公分時， $\text{tg } \delta = 0.7$ ， $E = 16.5$ 仟伏/公分時， $\text{tg } \delta = 0.1$ 。強性鹽的體電阻系數在稍微高的溫度下，急劇下降， $+43^\circ\text{C}$ 時， $\rho = 5 \cdot 10^{10}$ 歐姆·公分。

機械壓縮晶體會強烈地改變着滯後曲線的形狀，同時在弱電場中，介質常數也急劇地下降（圖 3），可能只等於數個單位；壓電效應只能在很窄的溫度範圍內有顯著表現（圖 4）。強性鹽（參閱 31 頁），在 $t = 20^\circ\text{C}$ 時，壓電系數的值（平均值）如下：

不變向負荷時（靜力狀態）

$$d_{14} = 2.64 \cdot 10^{-9} \text{ CFCe}_0 = 8.8 \cdot 10^{-9} \text{ 庫倫/牛頓；}$$

$$d_{25} = -5.63 \cdot 10^{-11} \text{ 庫倫/牛頓，}$$

$$d_{36} = 1.18 \cdot 10^{-11} \text{ 庫倫/牛頓；}$$

變向負荷時（動力狀態）

$$d_{14} = 2.7 \cdot 10^{-10} \text{ 庫倫/牛頓，}$$

$$d_{25} = -5.6 \cdot 10^{-11} \text{ 庫倫/牛頓，}$$

$$d_{36} = 1.17 \cdot 10^{-11} \text{ 庫倫/牛頓。}$$

頻率特別高時，如 10^9 赫芝，強性鹽的介質常數不大，壓電形變來不及產生，更確切地說，就是壓電形變來不及隨着電場改變。所以在高頻下，介質常數非常接近于無形變晶體的數值。

研究強性鹽的同時，И. 里庫卡脫夫 И. 科別科和其他一些科學家証明了：如果在強性鹽中加一些與它同晶體但不具有強電性能的物質，可改變介質常數，並使其居里點移入更低的溫度區。這一點是在強性鹽內加入鈉

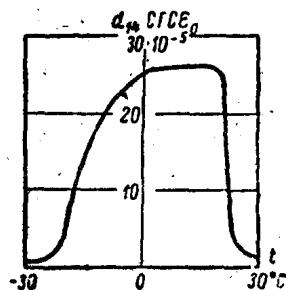


圖 4 直流電場中壓電系數 d_{14} 的溫度關係。

鉍盐、鉍盐、鈉鉍盐时發現的；虽然这些化合物在成分与晶体結構方面和强性盐非常近似，但不具有强电性能。同晶的摻合物对强性盐的作用是不同的，如鈉鉍盐的作用是降低介質常数，縮小强电区域，使最高居里点移入更低的溫度区；如果鈉鉍盐的濃度特別大，則只能获得具有一个最高居里点的强电体。上述的摻合物，只有当所含强性盐的分量很多时，才能具有强电性能[参考文献 5]。

在廿世紀四十年代，發現了另外一些强电体，这些强电体与强性盐不同，只有一个居里点。像亞磷酸鉀 (KH_2PO_4) 是其中的一种，对于这种强电体，居里点是在很低的溫度上； -158°C ，此时沿着晶軸 c 的 ϵ 值为 47500；在标准溫度下 $\epsilon < 100$ 。如以重氫代替氫，所得的結晶体 (KD_2PO_4) 的居里点在 $t = -68^\circ\text{C}$ 。

另有一种具有强电性的物質——砷酸鉀 (KH_2AsO_4)，其居里点在 $t = -182^\circ\text{C}$ ，此时沿着晶軸 c 的 ϵ 值等于 36500；标准溫度下，所有这些物質的介質常数都很小，并且他們不具有强电性能。

分析一下上述强性盐的主要性能，結果就会發現它有很多的缺点，妨碍了它在技术上的应用。这些缺点首先是它的很高的介質常数与極强的非直綫性能只能存在于極狹窄的溫度範圍內，而在后期發現的同类强电体中，这些性能又只能在很低的溫度下才出現，例如 KH_2PO_4 在 $t = -158^\circ\text{C}$ ； KH_2AsO_4 在 $t = -182^\circ\text{C}$ 。其次頻率高于 5000 赫芝时强性盐不能应用，因为它的介質常数与電場强度的关系消失了。

電場方向在强性盐的晶体內必須順着强性軸（軸 a ）；仅仅在这样的情况下，才有上述的特性。强性盐难以利用还因为它的絕緣强度非常低，化学——物理性能不佳（脆，化学性能不穩定，易溶于水，加热时易裂开，在不高的溫度約 50°C 时要分解等）。陶瓷强电体在很大的程度上已摆脱了这些缺点，在外電場的作用下，强性陶瓷內的極化过程与直綫性陶瓷不同，前者的極化不仅仅是电荷的位移，同时靠其他極化区域的縮小而使某些自發極化区域

增長，整個的區域在電場中取向；也可能重生和增長新的極化區。陶瓷強電體在寬廣的溫度與頻率（ $10^7 \sim 10^8$ 赫芝）的範圍內仍保持強電的性能；由於本身的結構是多晶體，陶瓷強電體在電場的各個方向都可呈現強電性能，不像在強性鹽中，電場的方向只有沿着某個晶軸時才具有強電性能，強性瓷在電場作用後具有壓電的性能。陶瓷強電體的絕緣強度在空氣中試驗時，比強性鹽大 1~3 倍。最後，還有一點起着重要的作用，即強性瓷和強性鹽的不同是它具有很高的機械強度，很高的化學穩定性、防潮性以及耐熱性。生產陶瓷並不需要用稀有的原料，工藝較簡單，可製成各種外形尺寸的制品，同時又有可能使主要的生產過程機械化，若要小規模地製造，在工廠、研究所或設計局的試驗室內製造也可以。

在偉大的衛國戰爭年代，蘇聯科學院物理研究所曾進行過多次研究，目的在於設計出各種類型的新的陶瓷電容器。在研究過程中，B. M. 符爾和它的同事們合成了新型陶瓷——具有強電體特性的鈦酸鋇。鈦酸鋇各種特性研究的結果和對這個問題在理論上第一次的闡述，於 1945 年在蘇聯首先發表。這些研究工作，涉及到元素周期表第二族金屬鈦酸鹽的性能，鈦酸鋇是其中之一〔參考文獻 6〕；發現了電場強度和壓力對介質常數〔參考文獻 7〕和其他參數的影響。

上面提到的許多著作中，包括着證明鈦酸鋇是屬於強電體的一些基本數據和物理概念〔參考文獻 9〕，在當時也發展了強電體的理論〔熱動力學的理論〕〔參考文獻 10〕。這種理論將強電體內的晶相轉變視為第一種或者第二種接近於臨界居里點的晶相轉變。

1944 年，在外國的技术刊物上，曾報道過介質常數大於 1000 的材料，但是未指出這些材料的組成成分。到 1946 年才首次發表了有關陶瓷強電體及其組成成分和結構的數據〔參考文獻 11〕。在這篇文章里指出，戰爭時期已經開始研究強性陶瓷，1943 年已經獲