

铁电晶体 $(K_{0.20}Na_{0.20}Sr_{0.60}Ba_{0.20})Nb_2O_6$ 全部电弹常数的测定

许煜寰 陈焕矗
(中山大学物理系) (山东大学晶体研究所)

1982年5月13日收到

提 要

本文讨论了由作者首次人工合成的新的钨青铜结构铁电单晶 $(K_{0.20}Na_{0.20}Sr_{0.60}Ba_{0.20})Nb_2O_6$ 全部电弹常数的测量方法和测量程序。第一次发表了该晶体的全部电弹常数及电-机耦合系数等共53个数据。绝大多数的数据是按IRE标准进行测量的。采用了 $(xxl)45^\circ$ 切片的厚度切变振动模式和 $(xxl)45^\circ$ 棒的长度扩张模式来测定弹性系数 s_{11}^D 和 s_{33}^D 。对实验过程引起的测量误差进行了讨论。

一、引 言

铁电单晶 $(K_xNa_{1-x})_{0.4}(Sr_yBa_{1-y})_{0.6}Nb_2O_6$ (其中 $0.50 \leq x \leq 0.75$, $0.30 \leq y \leq 0.92$; 简称为KNSBN)系列是作者在1981年首先人工合成的新的晶体。晶体属于 A 位填满型钨青铜结构,在室温呈点群 $4mm$ 对称性。这种晶体容易用提拉法由熔体中生长出透明的大单晶,熔点约为 1500°C 。单晶具有不溶于水、机械强度好、易于加工,压电效应强,介电常数较低,热电系数高等优点。有关晶体生长方法及铁电、热电等数据已经由作者发表了^[1,2]。本工作首次对 $x=0.50$, $y=0.75$ 的KNSBN晶体,用IRE标准测量了全部介电、弹性和压电等常数,发表了53个数据的测量结果。

二、测 量 方 法

KNSBN晶体在室温时的宏观对称性呈点群 $4mm(C_{4v})$ ^[1],晶体的电弹常数张量如下:

$$\text{介电常数 } (\epsilon_{mn}) = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix};$$

$(m, n = 1, 2, 3)$

$$\begin{aligned} \text{弹性系数 } (s_{ij}) &= \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix}; \\ \text{压电模量 } (d_{nj}) &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

1. 用交流电桥测量介电常数张量

恒应力相对介电常数 $\epsilon_{mn}^T/\epsilon_0$ 及恒应变相对介电常数 $\epsilon_{mn}^S/\epsilon_0$ 分别由测量晶片的低频 (1KHz) 和 高频 ($> 20\text{MHz}$) 的电容量 C 得出. 相对介电常数按下式计算:

$$\epsilon_{mn}/\epsilon_0 = \frac{C \cdot t}{A \cdot \epsilon_0}, \quad (1)$$

其中 A 为晶片样品的电极面积, t 为两电极间的距离 (等于晶片的厚度), $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, 为真空电容率. 在测量介电常数的同时, 可测出介质损耗角正切 $\tan\delta$.

恒应力介质隔离率 β_{mn}^T 和恒应变介质隔离率 β_{mn}^S 由下式给出:

$$\beta_{mn} = (-1)^{m+n} \frac{\Delta_{\epsilon_{mn}}}{\Delta_{\epsilon}}, \quad (2)$$

其中 Δ_{ϵ} 为介电常数张量 (ϵ_{mn}) 的代数行列式, $\Delta_{\epsilon_{mn}}$ 为 ϵ_{mn} 项的代数余子式.

2. 用传输线方法测量弹性、压电张量

本工作所用的传输线方法主要是根据 IRE 标准所规定的压电晶体弹性、压电常数的测量方法^[3], 也参考了文献[4]. 测量方法的理论依据如下:

将正弦交变电压加在一定取向和一定形状的压电晶体样品上, 使晶体样品发生受迫的简谐振动. 设 ξ_k 为晶体的体积元 $dx dy dz$ 在 k 方向的位移量, ρ 为晶体的密度, E_n 为加在晶体上的电场的分量. 根据牛顿运动方程和压电方程组, 以 SI 单位制表示, 便有如下关系^[5]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial t^2} &= \sum \left(\frac{1}{s_{ij}^E} \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial u_k^2} + \frac{d_{nj}}{s_{ij}^E} \frac{\partial E_n}{\partial u_k} \right), \\ D_m &= \sum \left(\epsilon_{mn}^T - \frac{d_{mj}^2}{s_{ij}^E} \right) E_n + \sum \left(\frac{d_{mj}}{s_{ij}^E} \frac{\partial \xi_k}{\partial u_k} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

其中 D_m 为电位移矢量的分量, u_k 为坐标的三个方向, 式中的求和号按张量运算规则求和.

考虑到由于晶体样品在正弦交变电场作用下作简谐振动, 有 $\xi_k = \xi_{k0} e^{i\omega t}$; 样品在自由振动状态下, 振动方向的表面处应力为零, 以及电极面是等位面等边界条件, (3) 式可以进一步简化, 并解出谐振频率 f_r 与反谐振频率 f_a 对弹性系数 s_{ij} 的关系. 再由内能表达

式和电-机耦合系数的定义(见文献[3])以及已测得的 ϵ_{mn} 和 β_{mn} , 可以将全部弹性、压电常数求出.

如果我们选择一定取向和一定形状的晶体切片, 就可以用一定方向的电场激发出特定的模式的谐振, 从而得到各种需要的模式的 f_r 和 f_a .

三、晶体样品的切割及测量程序

我们取宏观坐标 X, Y, Z 方向与四角晶系的晶轴 a, a, c 方向重合. (xy) 切片 (a 切片) 及 (zx) 切片 (c 切片) 可供交流电桥测量介电常数张量及介质损耗角正切使用.

对 (zx) 切片(长度 l 沿 a 轴的 c 切晶板), 令交变电场沿 c 轴方向施加, 可测出基波及各高次谐波的谐振频率 f_{ri} 和反谐振频率 f_{ai} , 这时有

$$\frac{1}{s_{11}^E} = 4\rho(f_{ri} \cdot l/i)^2, \quad i = 1, 3, 5, \dots, \quad (4)$$

$$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = \frac{\pi}{2} \frac{f_a}{f_r} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a}\right), \quad (5)$$

$$d_{31}^2 = k_{31}^2(\epsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E), \quad (6)$$

$$s_{11}^D = (1 - k_{31}^2)s_{11}^E. \quad (7)$$

由这些关系可求得 $s_{11}^E, s_{11}^D, k_{31}$ 和 d_{31} .

对 (zx) 切片(长度 l 沿 a 轴, 厚度为 t 的 c 切晶板), 令交变电场沿 a 轴方向施加, 这时有如下关系:

$$\frac{1}{s_{55}^D} = 4\rho(f_{ai} \cdot t/i)^2, \quad i = 1, 3, 5, \dots, \quad (8)$$

$$k_{15}^2 = 1 - (\epsilon_{11}^S / \epsilon_{11}^T), \quad (9)$$

$$s_{55}^E = s_{55}^D / (1 - k_{15}^2), \quad (10)$$

$$d_{15} = k_{15} \cdot (\epsilon_{11}^T \cdot s_{55}^E)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

由此可得 $s_{55}^E (= s_{44}^E), s_{55}^D (= s_{44}^D), k_{15}$ 和 d_{15} .

对于长度 l 沿 c 轴的 Z 棒晶柱, 电场沿 c 轴方向施加, 这时有

$$\frac{1}{s_{33}^D} = 4\rho(f_{ai} \cdot l/i)^2, \quad i = 1, 3, 5, \dots, \quad (12)$$

$$k_{33}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a}\right), \quad (13)$$

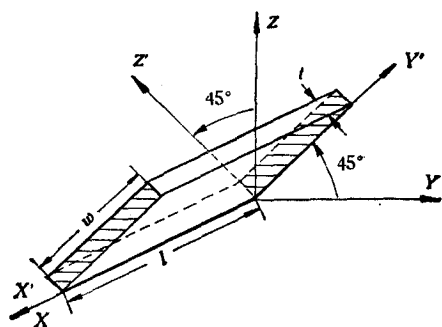
$$s_{33}^E = s_{33}^D / (1 - k_{33}^2), \quad (14)$$

$$d_{33} = k_{33}(\epsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E). \quad (15)$$

可求出 $s_{33}^E, s_{33}^D, k_{33}$ 和 d_{33} .

对于方形的 c 切片, 加上 c 方向的电场之后, 可以激励起多种轮廓振动模式, 由其中的平面伸缩模式 III 与模式 IV 的频率常数 N_{III} 与 N_{IV} 的比值, 通过查表, 求出泊松比 σ^E (见文献[3]), 由

$$\sigma^E = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}, \quad (16)$$

图1 $(zx\bar{l})45^\circ$ 切片, 电场沿 X 轴

便可得到 s_{12}^E .

由于上述切割的样品均不能激发出含有 s_{66} 的剪切模式. 所以考虑了用图1所示的 $(zx\bar{l})45^\circ$ 切片, 沿切片法线方向的坐标系 (X', Y', Z') 与原来坐标系 (X, Y, Z) 的线性变换矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 0 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

这样, 在新的坐标系 (X', Y', Z') 中, 晶体的电弹张量变为(计算方法可参考文献[5])

$$\begin{pmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(e_{11} + e_{33}) & \frac{1}{2}(e_{33} - e_{11}) \\ 0 & \frac{1}{2}(e_{33} - e_{11}) & \frac{1}{2}(e_{11} + e_{33}) \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} s_{11} & \frac{(s_{12} + s_{13})}{2} & \frac{(s_{12} + s_{13})}{2} & s_{13} - s_{12} & 0 & 0 \\ \frac{(s_{12} + s_{13})}{2} & \frac{1}{4}(s_{11} + 2s_{13} + s_{33} + s_{55}) & \frac{1}{4}(s_{11} + 2s_{13} + s_{33} - s_{55}) & \frac{(s_{33} - s_{11})}{2} & 0 & 0 \\ \frac{(s_{12} + s_{13})}{2} & \frac{1}{4}(s_{11} + 2s_{13} + s_{33} - s_{55}) & \frac{1}{4}(s_{11} + 2s_{13} + s_{33} + s_{55}) & \frac{(s_{33} - s_{11})}{2} & 0 & 0 \\ s_{13} - s_{12} & \frac{(s_{33} - s_{11})}{2} & \frac{(s_{33} - s_{11})}{2} & s_{11} - 2s_{13} + s_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(s_{55} + s_{66})}{2} & \frac{(s_{55} - s_{66})}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(s_{55} - s_{66})}{2} & \frac{(s_{55} + s_{66})}{2} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

以及

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_{15}}{\sqrt{2}} & \frac{d_{15}}{\sqrt{2}} \\ \frac{d_{31}}{\sqrt{2}} & \frac{d_{31} + d_{33} + d_{15}}{2\sqrt{2}} & \frac{d_{31} + d_{33} - d_{15}}{2\sqrt{2}} & \frac{d_{33} - d_{31}}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{d_{31}}{\sqrt{2}} & \frac{d_{31} + d_{33} - d_{15}}{2\sqrt{2}} & \frac{d_{31} + d_{33} + d_{15}}{2\sqrt{2}} & \frac{d_{33} - d_{31}}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

由此可见,对于 $(xzt)45^\circ$ 切片,按新的坐标系有弹性系数分量 $s'_{55} = \frac{1}{2}(s_{55} + s_{66})$, 压电系数分量 $d'_{15} = \frac{1}{\sqrt{2}}d_{15}$, 以及介电常数分量 $\epsilon'_{11} = \epsilon_{11}$. 对于该晶片在 X' ($=X$) 方向施加电场,可激发起厚度 (t) 的剪切振动模式(绕 Y' 轴切变). 由反谐振频率 f_a , 根据公式

$$\frac{1}{s_{55}^{D'}} = 4\rho(f_a \cdot t)^2, \quad (21)$$

$$s_{66}^D = 2s_{55}^{D'} - s_{55}^D, \quad (22)$$

便可求得 s_{66}^D . 又根据(18)式,可知 $\epsilon'_{11} = \epsilon_{11}$, 故根据(9)式,有 $k'_{15} = k_{15}$. 则由

$$s_{55}^{E'} = s_{55}^{D'} / (1 - k_{15}^2) \quad (23)$$

和

$$s_{66}^E = 2s_{55}^{E'} - s_{55}^E \quad (24)$$

可得到 s_{66}^E .

弹性系数 s_{33}^D 和 s_{33}^E 可以用图 2 所示的 $(xzt)45^\circ$ 棒来测定. 对于 $(xzt)45^\circ$ 棒在 Z' 方向施加电场,可激发起长度 (l) 的扩张谐振模式. 测量出谐振和反谐振频率,根据公式

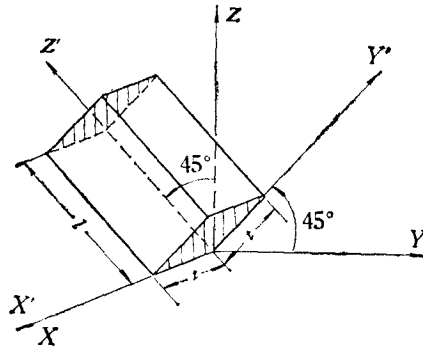


图 2 $(xzt)45^\circ$ 棒,电场沿 Z' 轴

$$(s_{33}^{D'})^{-1} = 4\rho(f_a \cdot l)^2, \quad (25)$$

$$(k'_{33})^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a}\right), \quad (26)$$

$$s_{33}^{E'} = s_{33}^{D'} / [1 - (k'_{33})^2], \quad (27)$$

可求出 $s_{33}^{D'}$ 和 $s_{33}^{E'}$. 由(19)式可知,此时有

$$s'_{33} = \frac{1}{4}(s_{11} + 2s_{13} + s_{33} + s_{55}), \quad (28)$$

若 s_{11} , s_{33} , s_{55} 均已分别独立地测出,由上式便可求得 s_{13}^D 和 s_{13}^E . 因此,全部恒电场弹性常数 (s_{ij}^E) 的分量和压电常数 (d_{nj}) 的分量数据都已得到.

压电常数 (g_{ni}) 的分量可由下式算出:

$$g_{ni} = \sum \beta_{nm}^T \cdot d_{mj}, \quad (m, n = 1, 2, 3, i, j = 1, 2, \dots, 6). \quad (29)$$

剩下的恒电位移弹性系数 (s_{ij}^D) 的一些分量可根据下式得出:

$$s_{ij}^D = s_{ij}^E - \sum g_{ni} \cdot d_{nj}. \quad (30)$$

根据定义, s_{ij} 与 c_{ij} 之间有下列关系:

$$c_{ij} = (-1)^{i+j} \frac{\Delta_{s_{ij}}}{\Delta_s}, \quad (31)$$

其中 Δ_s 代表弹性系数张量 (s_{ij}) 的代数行列式, 而 $\Delta_{s_{ij}}$ 则代表 s_{ij} 项的代数余子式, 即

$$\begin{aligned} \Delta_s &= s_{55}^2 s_{66} (s_{11}^2 s_{33} + 2s_{12} s_{13}^2 - 2s_{11} s_{13}^2 - s_{12}^2 s_{33}), \\ \Delta_{s_{11}} &= s_{55}^2 s_{66} (s_{11} s_{33} - s_{12}^2), \\ \Delta_{s_{12}} &= s_{55}^2 s_{66} (s_{12} s_{33} - s_{13}^2), \\ \Delta_{s_{13}} &= s_{55}^2 s_{66} (s_{12} s_{13} - s_{11} s_{13}), \\ \Delta_{s_{33}} &= s_{55}^2 s_{66} (s_{11}^2 - s_{12}^2), \\ \Delta_{s_{55}} &= s_{55} s_{66} (s_{11}^2 s_{33} + 2s_{12} s_{13}^2 - 2s_{11} s_{13}^2 - s_{12}^2 s_{33}), \\ \Delta_{s_{66}} &= s_{55}^2 (s_{11}^2 s_{33} + 2s_{12} s_{13}^2 - 2s_{11} s_{13}^2 - s_{12}^2 s_{33}). \end{aligned} \quad (32)$$

分别将 s_{ij}^E 和 s_{ij}^D 的数据代入(31)式与(32)式, 即可求得 (c_{ij}^E) 和 (c_{ij}^D) 的各分量.

最后, 其余两个压电常数张量 (h_{nj}) 和 (e_{nj}) 的分量可按下列公式求出.

$$h_{nj} = \sum g_{ni} \cdot c_{ij}^D, \quad (m, n = 1, 2, 3, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6), \quad (33)$$

$$e_{nj} = \sum e_{im}^i \cdot h_{mj}. \quad (34)$$

四、实验过程和测量结果

晶体在生长出来以后, 经缓慢降温退火, 以消除内部应力. 测出晶体密度 $\rho = 5.16 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 用 X 射线劳厄背射法确定晶轴方向, 再按表 1 的各种切割方式 (使晶格的 c 轴沿 Z 方向, 两个 a 轴分别沿 X 和 Y 的方向) 切割成各种形状样品, 全部样品均从同一块晶体切出. 定向与切割的最大误差范围为 $\pm 2^\circ$.

切割后的样品经过 600 号金刚砂研磨, 再用 $0.1 \mu\text{m}$ 的 MgO 粉抛光, 然后用测长显微镜和螺旋测厚仪测量样品的尺寸, 读数准确到 0.01 mm . 每种类号的样品不少于 3 片, 以便求得各振动模式的平均频率常数. 各类号样品的形状与尺寸列于表 1.

表 1 晶体样品的形状与尺寸

类 号	切割方式	尺寸 (mm)	激励电场的方向
1	(xy) 切片	$4 \times 4 \times 2$	平行 X 轴
2	(zx) 切片	$4 \times 4 \times 0.5$	平行 Z 轴
3	(zx) 切片	$10 \times 3 \times 1$	平行 Z 轴
4	(zx) 切片	$10 \times 3 \times 1$	平行 X 轴
5	Z 棒	$3 \times 3 \times 10$	平行 Z 轴
6	(xzl) 45° 切片	$4 \times 2 \times 1$	平行 X 轴
7	(xzt) 45° 棒	$1.5 \times 1.5 \times 6.5$	平行 Z' 轴

将全部样品在垂直于 c 轴的两个面 (对于图 1 及图 2, 则是与 c 轴成 45° 角的面) 上溅射上金电极, 使样品温度升到居里点以上 (约到 200°C), 然后沿样品 c 轴施加约 1 kV/mm 的直流极化电场, 并使样品带电场冷却到室温, 使晶体单畴化. 极化后的样品, 均用 Berlincourt Piezo- d_{33} 仪检验, 确定 d_{33} 值已达到饱和稳定, 再进行各项常数的测量. 对于

类号为 1, 4, 6 的样品, 在极化以后除去面上的金电极, 再在垂直于 X 轴的一对 a 面涂上室温快干银浆作为电极。

类号 1 与类号 2 的样品的介电常数和介质损耗 $\tan \delta$ 是使用 Hewlett Packard 4274A 型自动电桥进行测量的, 分别测量弱交变电场 (1V) 时的低频 (1kHz) 和高频 (>20 MHz) 的电容值, 读数准确到第 4 位有效数字。

对于类号 2 至类号 7 的样品, 用 IRE 标准的传输线法测量, 用 Hewlett Packard 3585 型频谱分析仪 (20Hz—40MHz) 读数, 测量各种振动模式的基频和高次泛音的谐振频率和反谐振频率。读数准确到第 6 位有效数字。

将上述测得的数据依次代入 (4) 式至 (34) 式计算, 得到晶体的全部电弹常数等数值, 结果列于表 2。

表 2 $(K_{0.20}Na_{0.20}Sr_{0.60}Ba_{0.20})Nb_2O_6$ 晶体的全部电弹常数数据

名称	单 位	数据	名称	单 位	数据	名 称	单 位	数据
s_{11}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	5.3	c_{11}^E	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	2.4	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	无量纲	645
s_{12}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	-1.4	c_{12}^E	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.92	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	无量纲	556
s_{13}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	-1.9	c_{13}^E	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.73	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	无量纲	256
s_{33}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	8.9	c_{33}^E	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	1.5	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	无量纲	174
s_{55}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	16.6	c_{55}^E	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.60	β_{11}^T	$\times 10^8 \text{m}/\text{F}$	1.75
s_{66}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	15	c_{66}^E	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.66	β_{11}^S	$\times 10^8 \text{m}/\text{F}$	2.03
s_{11}^D	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	5.1	c_{11}^D	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	2.3	β_{33}^T	$\times 10^8 \text{m}/\text{F}$	4.41
s_{12}^D	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	-1.7	c_{12}^D	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.86	β_{33}^S	$\times 10^8 \text{m}/\text{F}$	6.49
s_{13}^D	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	0.79	c_{13}^D	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	-0.39	$\tan \delta_{11}(1\text{kHz})$	无量纲	0.002
s_{33}^D	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	6.4	c_{33}^D	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	1.7	$\tan \delta_{11}(10\text{MHz})$	无量纲	0.05
s_{55}^D	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	14.3	c_{55}^D	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.70	$\tan \delta_{33}(1\text{kHz})$	无量纲	0.005
s_{66}^D	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$	13	c_{66}^D	$\times 10^{11} \text{N}/\text{m}^2$	0.77	$\tan \delta_{33}(10\text{MHz})$	无量纲	0.04
d_{31}	$\times 10^{-12} \text{C}/\text{N}$	-25	h_{31}	$\times 10^9 \text{V}/\text{C}$	-3.8	k_{31}	无量纲	0.18
d_{33}	$\times 10^{-12} \text{C}/\text{N}$	75	h_{33}		5.9	k_{33}	无量纲	0.53
d_{15}	$\times 10^{-12} \text{C}/\text{N}$	114	h_{15}		1.4	k_{15}	无量纲	0.37
g_{31}	$\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{C}$	-1.1	e_{31}	$\times \text{C}/\text{m}^2$	-5.9	k_t	无量纲	0.41
g_{33}	$\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{C}$	3.3	e_{33}	$\times \text{C}/\text{m}^2$	9.1	σ^E	无量纲	0.26
g_{15}	$\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{C}$	2.0	e_{15}	$\times \text{C}/\text{m}^2$	6.9			

五、测量误差讨论

本工作中介电常数和频率测量的有效数字均在 4 位以上, 样品尺寸的测量有效数字在 3 位以上, 但晶体的定向切割误差范围达 $\pm 2^\circ$, 故误差的主要来源是由于晶体定向和切割的角度不准确引入的。其中受影响最大的是类号 6 及类号 7 的 $(xzl)45^\circ$ 切片和 $(xzt)45^\circ$ 棒。在上述角度误差范围内, 将导致 s_{55}' 和 s_{33}' 的相对误差达 $\pm 4\%$, 考虑到 s_{55} , s_{11} 和 s_{33} 的测量误差均在 $\pm 1.6\%$ 之内, 故根据 (22), (24) 和 (28) 式得出的 s_{66} 和 s_{13} 的相对误差均将为 $\pm 10\%$ 。根据 (31) 式得出的 c_{66} 和 c_{13} 的相对误差也将达 $\pm 10\%$ 。这是本工作全部测量结果中误差最大的数据。

对于由传输线法测得的一些物理常数,曾用其它测量方法和计算公式作了比较. 对于 d_{33} 我们使用了 Berlincourt Piezo- d_{33} 仪进行了直接测量,其结果为 $80 \times 10^{-12}\text{C/N}$, 比用传输线法测量,由(15)式所得到的 $75 \times 10^{-12}\text{C/N}$ 相差达 6%. 我们采用了由 IRE 标准得出来的数据.

作者感谢美国宾夕法尼亚州立大学材料研究所副所长 L. E. Cross 教授为我们提供实验仪器设备和其它方面的帮助,感谢 Thomas R. Shrout 博士为我们复核了某些数据.

参 考 文 献

- [1] 陈焕鑫、许煜寰,物理, **10**(1981), 729.
- [2] 许煜寰、陈焕鑫,中山大学学报(自然科学版), **2**(1982), 52.
- [3] IRE Standards on Piezoelectric Crystals, Proc. IRE, **45**(1957), 353; **46**(1958), 764; **49**(1961), 1161.
- [4] 刘鸿举等,声学学报, **2**(1980), 134.
- [5] W. P. Mason, Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics, D. Van Nostrand and Co., Inc., New York, (1950).

DETERMINATION OF THE COMPLETE SET OF ELECTROELASTIC CONSTANTS OF FERROELECTRIC CRYSTAL

($\text{K}_{0.20} \text{Na}_{0.20} \text{Sr}_{0.60} \text{Ba}_{0.20}$) Nb_2O_6

Xu Yu-huan

(Department of Physics, Zhongshan University)

Chen Huan-chu

(Institute of Crystal Materials, Shandong University)

ABSTRACT

This paper discusses the measuring method and the measuring program of all of the dielectric, elastic and piezoelectric constants of ferroelectric single crystal ($\text{K}_{0.20} \text{Na}_{0.20} \text{Sr}_{0.60} \text{Ba}_{0.20}$) Nb_2O_6 . This crystal was first grown by the authors. All 53 data of the dielectric, elastic and piezoelectric constants and some of the electromechanical coupling factors are published for the first time. Most of these data are measured in accordance with "IRE Standards on Piezoelectric Crystals" except that elastic coefficients s_{66} and s_{13} are measured by the thickness shear mode of the (zxl) 45° specimens and the length extensional mode of the (xzt) 45° bars respectively. The measuring accuracies are also discussed.