

前 言

本标准根据 GB/T 1.1—1993《标准化工作导则 第1单元：标准的起草与表述规则 第1部分：标准编写的基本规定》表达了介电晶体介电性能的试验方法。

本标准参考了 GB 11297.11—89《热释电材料介电常数的测试方法》、GB 11297.9—89《热释电材料介质损耗角正切 $\tan \delta$ 的测试方法》及 GB 11294—89《红外探测材料半导体光电材料和热释电材料常用名词术语》三个标准。

本标准的特点是针对介电晶体的介电性能与其结晶学对称性有关，采用介电系数张量来描述其介电性能。本标准讨论了各种晶系晶体的介电系数张量的独立分量数目及其介电主轴的取法，同时给出了低频下其介电系数及介电损耗的测量方法。

本标准由中国科学院物理研究所提出。

本标准由中国科学院归口。

本标准起草单位：中国科学院物理研究所。

本标准主要起草人：张道范、朱镛。

1 范围

本标准规定了介电晶体的低频(10 MHz 以下)介电系数及介电损耗的试验方法。

本标准适用于介电晶体的介电性能的测定。

2 试验方法

2.1 介电系数

2.1.1 定义

介电系数 dielectric coefficient

将原来不带电的介电晶体置于电场中,在其内部和表面上会感生出一定的电荷即产生电极化现象,用电极化强度矢量 $\mathbf{P}$ 描述。当电场强度 $\mathbf{E}$ 不太强时,介质中的电极化强度 $\mathbf{P}$ 和电场强度 $\mathbf{E}$ 成线性关系。在一般情况下,晶体中的电极化强度矢量 $\mathbf{P}$ 与电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 有不同的方向,使得晶体内的电位移矢量 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 有不同的方向,在直角坐标系中,晶体内这三者的关系可用式(1)表示:

$$D_i = \epsilon_0 E_i + P_i = \epsilon_0 \epsilon_{ij} E_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$[\epsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: ϵ_0 ——真空介电系数,1,2,3 分别代表直角坐标轴 X, Y, Z ;

$[\epsilon_{ij}]$ ——晶体的介电系数张量,该张量为二阶对称极张量,即 $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$ 。

描述二阶张量可选用三个相互垂直的主轴为坐标轴(称主轴坐标系),在主轴坐标系中可将二阶介电系数张量简化为只含对角项,称主介电系数。

晶体的介电系数张量的独立分量数目与其对称性有关:

对于立方晶系只有一个独立的介电系数 $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33}$ 。

对于三方,四方,六方晶系有两个独立的介电系数 $\epsilon_{11} = \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$ 。取晶体的高次对称轴(c 轴)为一介电主轴,另两个介电主轴在垂直 c 轴的平面内,取结晶轴 a 轴为另一介电主轴。

对于正交晶系有三个独立的介电系数 $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$ 。取晶体的结晶轴(a, b, c 轴)为三个介电主轴。

对于单斜晶系有四个独立的介电系数 $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{31}$ 。取晶体的二次对称轴(b 轴)为一介电主轴。另两个介电主轴在垂直 b 轴的平面内,通过实验测量位于这平面内的三个独立的介电系数,可以确定这两个介电主轴的方向和大小。

对于三斜晶系有六个独立的介电系数 $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{31}$ 。可任意选一直角坐标系,通过实验测量六个独立的介电系数,经过数学运算可以确定三个介电主轴的方向和大小。

2.1.2 试验原理

在本标准的表示方法中, ϵ_{ij} 是无量纲量,即为相对介电系数。由于晶体的介电系数与测试频率有关,国家技术监督局 1997-05-28 批准 1998-02-01 实施

在低频条件下,直接用电桥方法测量样品的电容,经过计算求得介电系数。

根据晶体的结晶学点群,将晶体定出结晶轴方向,垂直于结晶轴方向切出薄片,制成类似与平行板电容器的样品。对于无限大(一般指电极面的尺度与其厚度之比 $>10:1$ 时)并且电极板与电介质间无间隙的平行板电介质电容器,电容量 C 表示为:

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中: ϵ_0 ——真空介电系数, $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$;

ϵ ——晶体的垂直于极板方向的介电系数;

A ——晶体的电极面积, cm^2 ;

d ——电极间距离,即晶体薄片的厚度, cm 。

在测量样品电容时,由于测量引线和样品夹具本身存在一恒定的电容 C_0 ,可认为 C_0 与样品的电容 C 成并联状态,因此,实际测得的电容值 $C_{\text{meas.}}$ 为:

$$C_{\text{meas.}} = C + C_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

用电桥测得放置样品时的 $C_{\text{meas.}}$ 值和不放置样品时的 C_0 值,晶体的介电系数为:

$$\epsilon = \frac{d}{A\epsilon_0} (C_{\text{meas.}} - C_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

2.1.3 样品制备

晶体经X射线定向,定出结晶轴方向,定向精度为 $\pm 1^\circ$,垂直于晶轴方向切出薄片,薄片厚度约为 $0.05 \text{cm} \sim 0.10 \text{cm}$ 。用千分表多次测量厚度,厚度的平均偏差应小于1%。

样品的面积约为 $0.3 \text{cm}^2 \sim 1.0 \text{cm}^2$,形状为圆形或矩形。

样品的两表面经细磨,抛光,清洁处理后,用蒸镀或涂敷等方式覆盖满金或银电极。

用测量显微镜多次测量电极面积,取平均值,误差应小于1%。

2.1.4 试验条件

由于介电晶体的介电系数与测量频率、测量电压有关,并与样品所处的温度、压力、湿度有关,有些样品还与本身的老化过程有关。因此,在测量时,对上述有关条件应给出明确规定。

样品处于恒温状态,温度波动范围应小于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

样品周围的湿度应低于60%,气压为当地大气压。

测量频率为 $100 \text{Hz} \sim 10 \text{MHz}$,频率误差为 $\pm 5\%$ 。

测量电场强度应小于 5V/cm 。

2.1.5 试验过程

a) 在样品电极面上用导电胶连结出电极引线。

b) 样品的极化和老化处理:对具有铁电性的样品,先进行单畴化处理。样品的老化处理是将样品的两电极短路,在室温下干燥空气中放置24 h。

c) 将样品置于金属制成的屏蔽盒内,两电极引线与屏蔽盒绝缘,屏蔽盒的外壳接地。

d) 样品的两电极引线经过同轴电缆线接到电容测量仪的测量端上,在一定的频率及低电场信号下,测出电容值 $C_{\text{meas.}}$ 和 $(\tan \delta)_{\text{meas.}}$ 值(δ 是介质中的电位移落后于电场的相位角)。

e) 取出样品后,测出测量引线和样品夹具的电容 C_0 值。

f) 按照式(5)计算样品的介电系数。

g) 在公布测量结果时,应注明测量频率和样品温度。

2.1.6 试验误差

测量出的介电系数的系统误差应小于 $\pm 3\%$ 。

2.2 介电损耗

2.2.1 定义

介电损耗 dielectric loss

在交变电场中,由于存在极化弛豫,介电晶体中产生介电损耗。介电损耗是指晶体在被反复极化的过程中,电场使介质极化所提供的能量,有部分要消耗于使固有电矩的反复取向转动,或使正负离子相互拉开或电子云发生畸变的方向不断变化,这部分能量不能转换成介质的极化而成为热运动被消耗掉,衡量这种介电损耗大小的因子为 $\tan \delta$ (δ 是介质中的电位移落后于电场的相位角),这是一个无量纲单位,它表示有功功率 P 与无功功率 Q 的比值。

2.2.2 试验原理

在测量样品的介电损耗时,有两种等效电路。图 1(a)表示并联等效电路。图 1(b)表示串联等效电路。

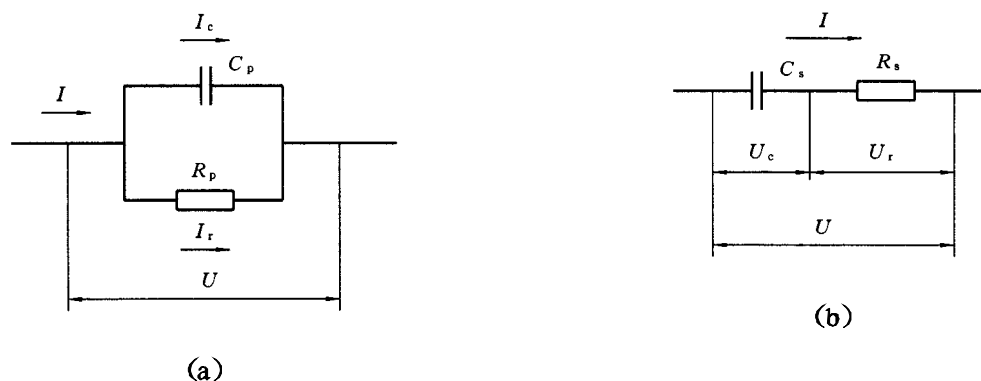


图 1 测量等效电路

图中: U —总电压, V ;

I —总电流, A ;

C_p —并联等效电容, F ;

R_p —并联等效电阻, Ω ;

I_c —流经并联等效电容的电流, A ;

I_r —流经并联等效电阻的电流, A ;

C_s —串联等效电容, F ;

R_s —串联等效电阻, Ω ;

U_c —串联等效电容上的电压, V ;

U_r —串联等效电阻上的电压, V 。

由图 1 可见,并联等效电路测量中,

$$\tan \delta = I_r/I_c = 1/\omega C_p R_p \quad \dots\dots\dots (6)$$

串联等效电路测量中,

$$\tan \delta = U_r/U_c = \omega C_s R_s \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: ω ——外加交流电压的角频率, s^{-1} 。

当考虑到测量引线和样品夹具本身存在一恒定的电容 C_0 可认为 C_0 与样品成并联状态,这样可推导出晶体的 $\tan \delta$ 值与实测值 $(\tan \delta)_{\text{meas.}}$ 之间的关系式:

$$\tan \delta = (\tan \delta)_{\text{meas.}} (1 + C_0/(C_{\text{meas.}} - C_0)) \quad \dots\dots\dots (8)$$

因此,用电桥测出 $C_{\text{meas.}}$, $(\tan \delta)_{\text{meas.}}$, C_0 , 可用式(8)算出晶体样品的 $\tan \delta$ 值。由于介电损耗与测量的电场强度、频率、温度等有关。因此,在测量时,上述有关条件应给出明确规定。

2.2.3 样品制备

按 2.1.3。

2.2.4 试验条件

按 2.1.4。

2.2.5 试验过程

按 2.1.5。

2.2.6 试验误差

测量出的介电损耗的系统误差应小于 $\pm 5\%$ 。
