

铁电体低频电滞回线的测量

王永令 林盛卫 徐丽华

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

一、引言

电滞回线是铁电体的主要特征之一，电滞回线的测量是检验铁电体的一种主要手段，常见的电滞回线如图 1 所示。通过电滞回线的测量，可测定铁电体的剩余极化强度 P_r 和矫顽场强 E_c ，对材料的研制和应用都有很大的意义。

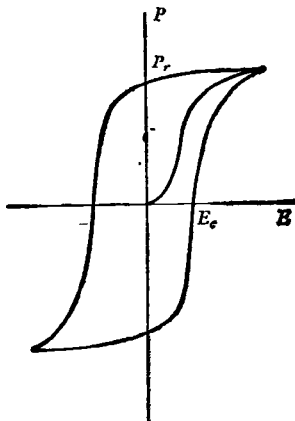


图 1 铁电体的电滞回线

测量电滞回线的基本电路是 Sawyer-Tower 回路，近年来测量频率已由 50 Hz 向低频方面发展，其原因是铁电体的电滞回线与温度有密切关系。在 50 Hz 的频率测量时，由于介电损耗而使试样发热，因此，测量结果不能反映真实的温度关系，尤其重要的是，就所测电滞回线来说，50 Hz 的频率太高，既不能测量铁电体的起始回线，也无法用函数记录仪记录。但如在低频下进行测量，上述问题就可得到解决，也提高了电滞回线测量的精度。

物理

低频电滞回线的测量，关键在于低频高压发生器的设计。本方法所用的低频高压发生器采用光电耦合器的电-光-电转换来获得调制讯号，调制两个极性相反的直流高压源，获得各种波形的低频高压输出。

我们对常用的铁电陶瓷进行了测量，获得了较好的结果。

二、低频高压发生器

发生器的基本原理如图 2 所示。两个极性相反的直流高压源通过两个高压三极管分别在正负半周内对负载供电。高压三极管的栅极电位由栅极调制器控制，灯丝由 6.3V 的隔离变压器供电。调制器处于高电位下工作，用干电池供电。

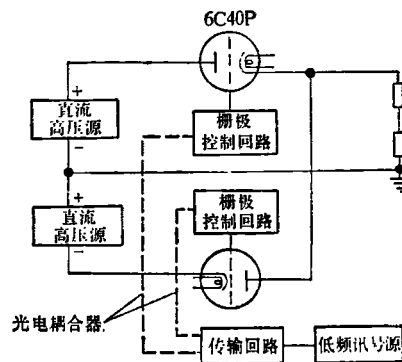


图 2 低频高压发生器方框图

超低频讯号发生器 (XD-5 型) 供给调制讯号，讯号经检波后分成正负两个半周，通过光电耦合器的电-光-电转换对栅极调制器提供低频调制讯号，如图 3 所示。在讯号传输回路中采

用了运算放大器,它能提供一定的直流偏压,消除了正负两个半周在零电位处的交迭失真,这是采用机械操作的同类发生器无法达到的。

高压发生器的输出波形、频率和幅度均由超低频讯号发生器控制。在总负载电容为 5×10^3 pF 时,发生器在 0.01 Hz 到 10 Hz 范围内,输出电压幅度为 ± 5 kV,输出波形可从正弦波、方波或三角波中任选一种。

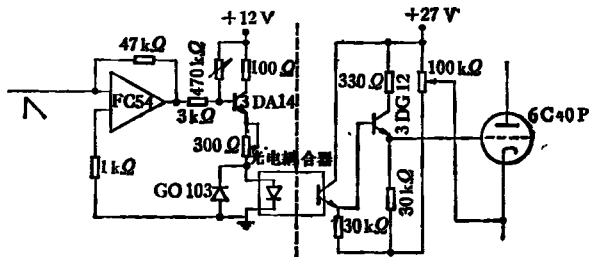


图3 负半周调制电路

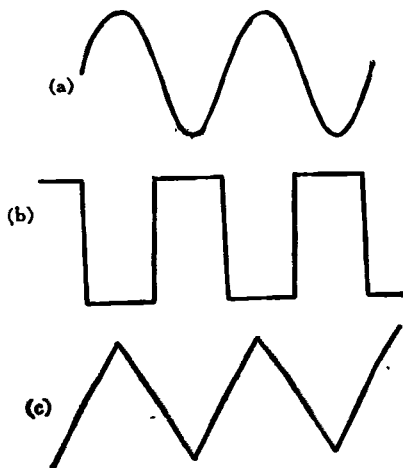


图4 高压发生器的输出波形 (0.1Hz, ± 3 kV)
(a) 正弦波; (b) 方波; (c) 三角波

三、测量原理和结果

电滞回线的测量采用 Sawyer-Tower 回路,用超低频示波器观察和函数记录仪记录,图5为测量示意图(具体线路详见电原理图)。因为示波器垂直偏转板之间的电容很小,与 C_0 相比可以忽略,因此 C_0 上的电压 V_0 正比于试样 C_x 上的电荷 Q ,而 C_x 与 C_0 相比也可忽略,即水平偏转板之间的电压 V_x 正比于试样两端的电

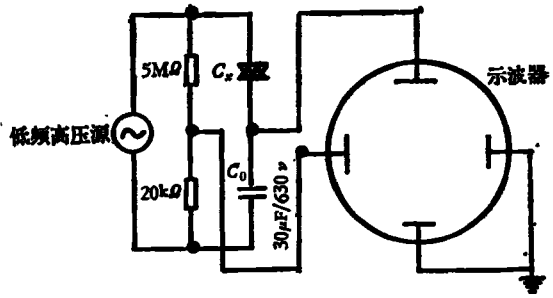


图5 电滞回线测量回路

压,因此在示波器上可以观察到试样的 $P-E$ 曲线,即电滞回线。

电原理图 16 中的氖泡 (50V) 和两只负极串接的稳压管是电路的过压保护元件。

由于在超低频下工作,画出一个回线所需的时间很长(最大约为两分钟),为使电荷不因漏导而损失,要求电荷测量回路(由 C_0 和示波器以及函数记录仪的输入阻抗组成)的时间常数 RC_0 比最大的工作周期大得多,为提高示波器和函数记录仪的输入阻抗,在 y 轴输入前加了一个阻抗变换器,满足了测量要求。

利用本方法对下列组成的铁电陶瓷材料进行了测量,试样尺寸为 $\phi 20 \times 1$ (mm),在两个主平面上焙烧银电极。

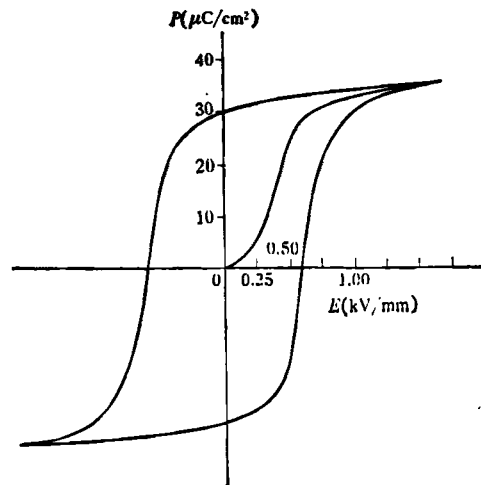
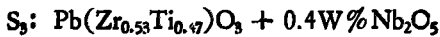
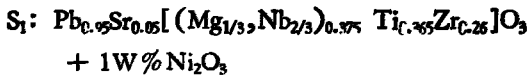


图6 S_1 起始电滞回线 (17°C, 0.05Hz)

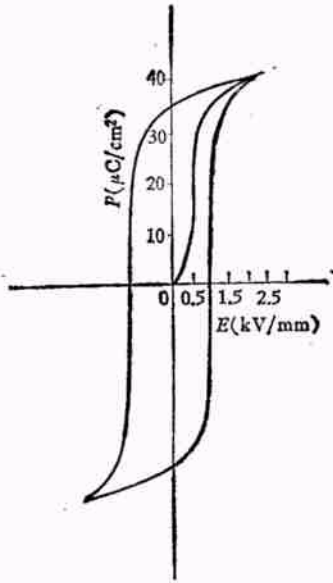


图7 S₃ 起始电滞回线 (17°C, 0.05Hz)

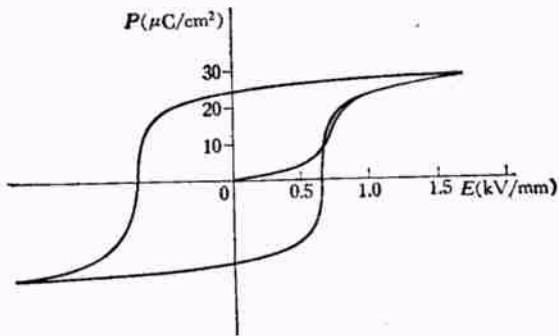


图8 PLZT (7.5/67/33) 起始电滞回线 (19°C, 0.05Hz)

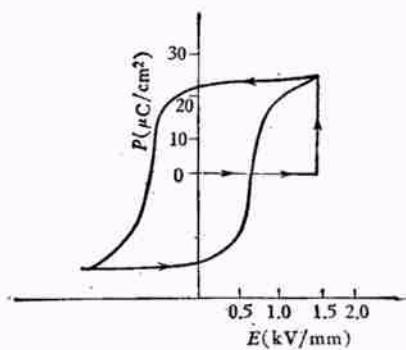


图9 PZT (95/5) 起始电滞回线 (130°C, 0.05Hz)

+ 0.6W% La₂O₃

F_c: Pb_{0.95}Sr_{0.05}(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃ + 1.5mol% CaFeO_{5/2}

F₃: Pb_{0.95}Sr_{0.05}(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃ + 0.4mol% Fe₂O₃

物理

+ 0.1mol% Bi₂O₃ + 0.2mol% MnO₂

F₄: Pb_{0.95}Sr_{0.05}(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃ + 0.112mol% Fe₂O₃

+ 0.1mol% Bi₂O₃ + 0.2mol% MnO₂

PLZT(7.5/67/33):

Pb_{0.925}La_{0.075}(Zr_{0.67}Ti_{0.33})_{0.981}O₃

NPS₁₃ (偏铌酸铅):

Pb_{0.94}Sr_{0.02}Ba_{0.02}Nb₂O₆

图6—图11为上述材料的起始电滞回线。从图中可以看到,对硬性材料(例如F_c和F₃)来

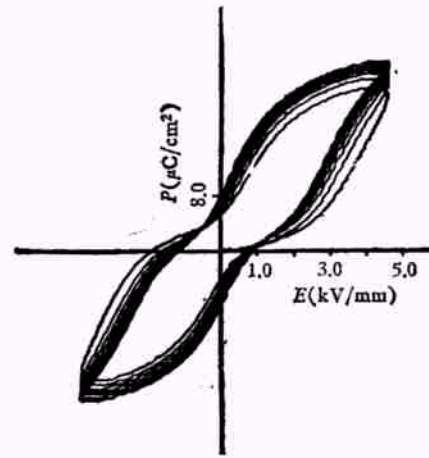


图10 F_c 起始电滞回线 (19°C, 0.05Hz)

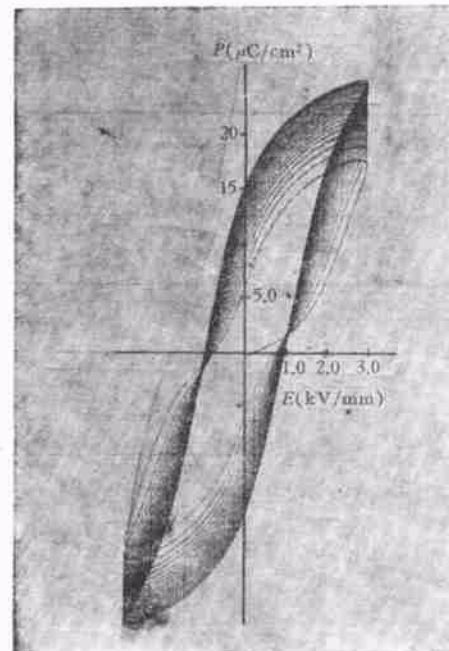


图11 F₃ 起始电滞回线 (19°C, 0.05Hz)

说,首次使极化转向的电场强度较大,开始时的头几个至第十几个回线并不重合,矫顽场在逐渐变小,剩余极化在逐渐增加。

图 12 和图 13 是 F_c 和 F_3 材料极化与未极化试样在稳定情况下的电滞回线。从图中可见,极化试样的 P_r 大为增加,回线的矩形性得到改善,而 E_c 稍有增加,变化不大。对软性材料 S_3 ,用极化与未极化试样所测得的 P_r 值非常接近。

几种铁电陶瓷 P_r 和 E_c 的测量结果列于表 1。

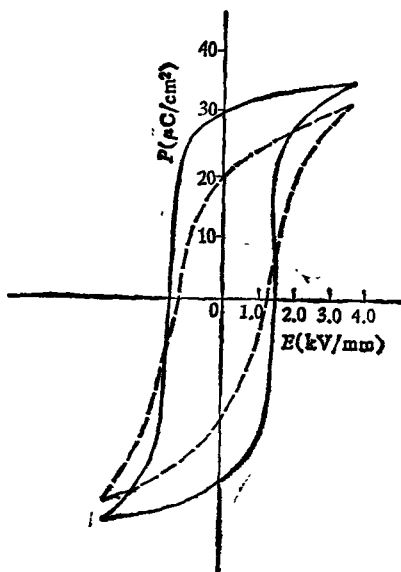


图 12 F_c 电滞回线 (19°C, 0.05Hz)
--- 极化前; —— 极化后

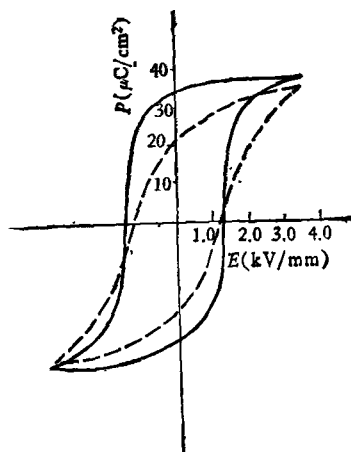


图 13 F_3 电滞回线 (19°C, 0.05Hz)
--- 极化前; —— 极化后

表 1 几种铁电陶瓷的 P_r 和 E_c 值

材 料	温度 (°C)	频率 (Hz)	P_r ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	E_c (V/mm)
S_1	17	0.05	30	650
S_3	17	0.05	36	1100
S_3 (极化后)	19	0.05	34	1200
F_c	19	0.05	20	1300
F_c (极化后)	19	0.05	29	1500
F_3	19	0.05	20	1200
F_3 (极化后)	19	0.05	31	1400
F_4	19	0.05	22	1000
F_4 (极化后)	19	0.05	33	1200
PLZT (7.5/67/33)	19	0.05	22	700
NPS ₁₃ (偏铋酸铅)	155	0.2	8	2600

四、讨 论

1. 有关 P_r 和 E_c 的测量误差。 P_r 和 E_c 值可由电滞回线测定。影响电滞回线测量的主要波形失真是零电位处的交迭失真,而在本测量方法中,由于消除了交迭失真,避免了这方面误差的来源。无论正弦波、三角波或矩形波,对回线测量的影响较小,因此,波形失真所带来的影响可以忽略。

试样的直流漏导对回线测量的影响较大,可以和 50 Hz 的测量一样,采取补偿措施来消除漏导的影响。

根据上述情况,在本测量中, P_r 和 E_c 的误差来源主要是电压的检测和尺寸的测量,下面分别加以讨论。

$$(1) P_r = \frac{Q}{S} = \frac{C_0 V_y}{\pi R^2} \quad (\mu\text{C}/\text{cm}^2); \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_r}{P_r} = \frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta V_y}{V_y} + 2 \frac{\Delta R}{R} + 2 \frac{\Delta V}{V}$$

其中 C_0 是标准电容器的容量,由 CCJ-1C 型精密电容测试仪测定,其相对误差 $\Delta C_0/C_0 < 0.5\%$; V_y 是 $E = 0$ 处的 y 轴电压,由函数记录仪测定,相对误差 $\Delta V_y/V_y < 1\%$; R 是试样的半径,测量误差小于 0.1mm,对 $\phi 20\text{mm}$ 试样而言, $\Delta R/R < 0.5\%$; $\Delta V/V$ 是校正阻抗变换器的 $V_{\lambda}/V_{\text{测}} = 1$ 时所引进的附加误差,电压由函数记录仪测定,因此, $\Delta V/V < 1\%$; 所以

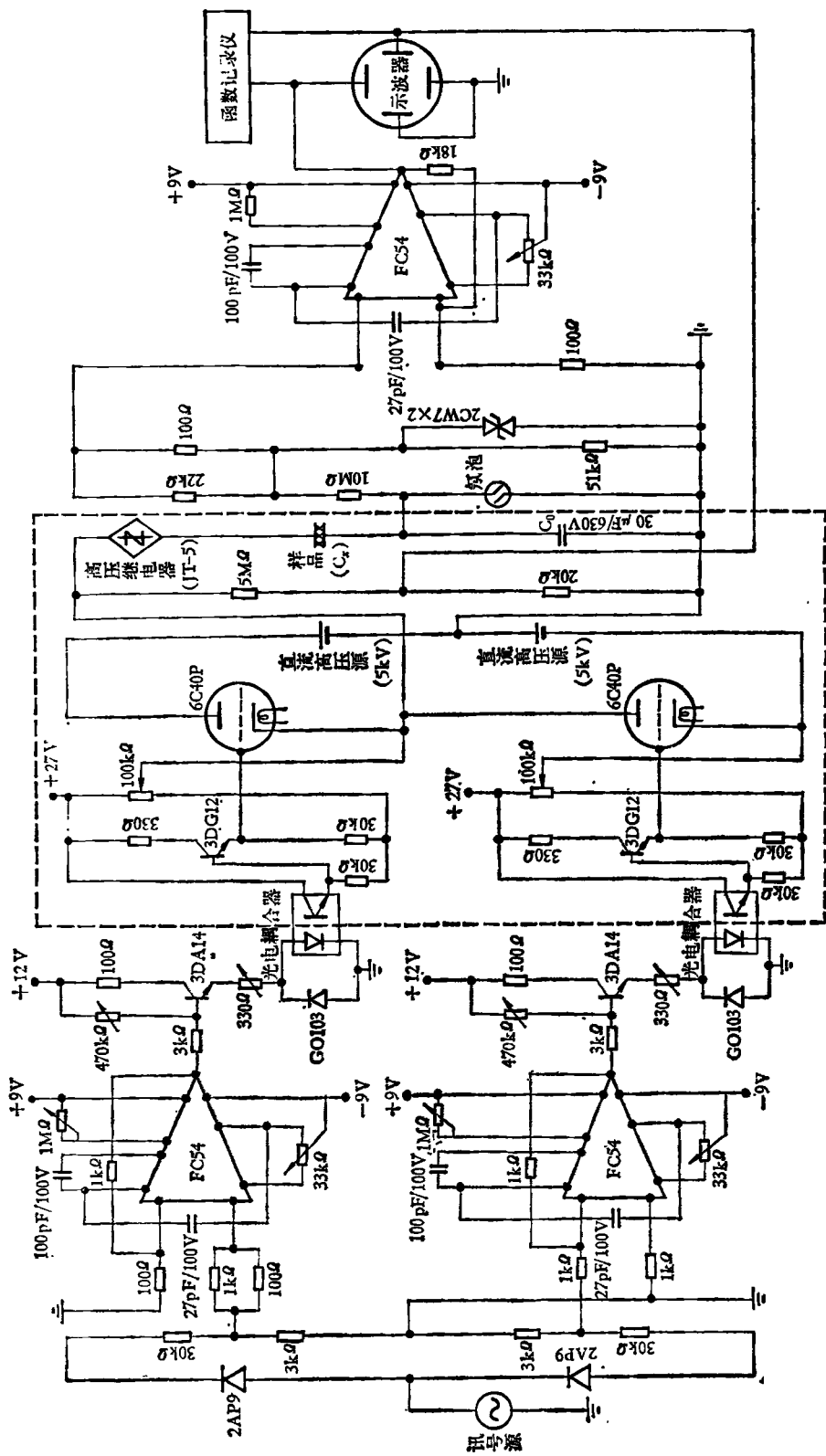


图16 低频电滞回线测量电原理图

$$\frac{\Delta P_r}{P_r} < 0.5\% + 1\% + 1\% + 2\% < 5\%.$$

$$(2) E_c = \frac{DV_x}{t} \text{ (V/mm)}; \quad (2)$$

$$\frac{\Delta E_c}{E_c} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta V_x}{V} + \frac{\Delta t}{t},$$

其中 D 为分压比, 用静电电压表和函数记录仪测定, 前者为 1.0 级表, 后者测量误差小于 1%, 因此 $\Delta D/D < 2\%$; V_x 是 $P_r = 0$ 处的电压, 由函数记录仪测定, 相对误差小于 1%; t 是试样厚度, 测量误差小于 0.02mm, 对 1mm 厚度的试样, 其相对误差小于 2%; 所以

$$\Delta E_c/E_c < 2\% + 1\% + 2\% = 5\%.$$

为了检验测量的可靠性, 我们对 PZT(95/5) 陶瓷, 用回线法和温度相变法来测定其 P_r ,

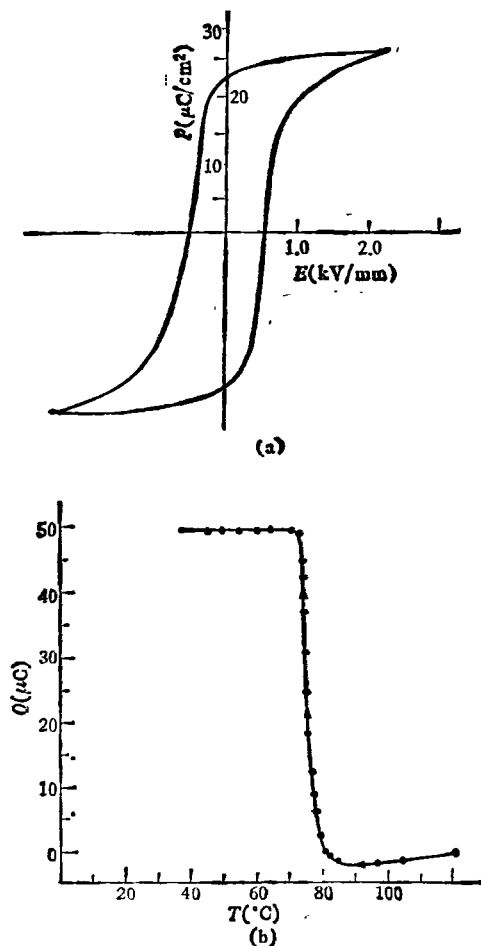


图 14 P_r 测定值的比较 (PZT-95/5, $\phi 16.7 \times 1$)
(a) 电滞回线法 ($P_r = 22.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$);
(b) 温度相变电荷释放法 ($P_r = 22.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)

结果分别为 $22.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 和 $22.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 相对误差为 2%, 实测的曲线由图 14 给出。

2. 用本方法测定了几种铁电陶瓷的起始电滞回线, 从图 6—图 11 可以看出, 不同的材料, 起始回线完全不同, 这是自发极化在电场作用下转向过程的宏观表现, 通过起始回线的测量, 为进一步研究材料的极化转向过程, 以及材料的研制和应用提供一定的依据。

3. 本测量方法中所用的低频高压发生器, 结构简单, 交迭失真小, 频率范围宽, 能输出各种波形, 因此可用来研究铁电材料的极化与频率和波形的关系; 另外, 与形变仪配合, 可测定铁电材料的极化形变或电诱相变形变。图 15 是一个实测的例子。

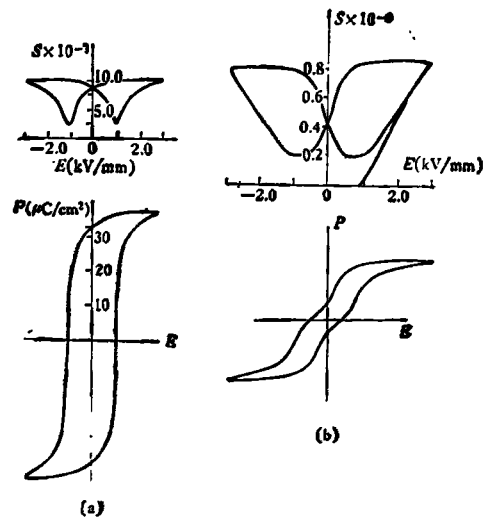


图 15 S, 极化形变曲线和 AR_7 的相变形变曲线
(19°C, 0.05Hz)
(a) S; (b) AR_7

4. 本测量中, 对试样的漏导还未加补偿线路, 过保护装置也不够完善, 试验精度也有待于进一步提高。此外, 如通过电子线路控制输入讯号的周期数目, 就可以在测量电滞回线时, 根据需要来选取一定的循环次数。

参 考 文 献

- [1] C. B. Sawyer and C. H. Tower, *Phys. Rev.*, 35 (1930), 269.
- [2] H. Diamant, K. Druck and R. Pepinsky, *Rev. Sci. Instr.*, 28(1957), 30.

- [3] N. W. Schubring, J. P. Nolta, R. A. Dork, *Rev. Sci. Instr.*, 35(1964), 1517.
 [4] J. K. Sinha, *J. Sci. Instr.*, 42(1965), 696.
 [5] Y. T. Tsui, P. D. Hinderaker and F. J. Mcfadden,

- Rev. Sci. Instr.*, 39(1968), 1423.
 [6] R. Miller, I. A. Black, V. N. Gray, *J. Phys. E. Sci. Instr.*, 8(1975), 749.

p-n 结正向特性测温

张开逊 王向

(第一机械工业部机械工业自动化研究所)

自从晶体管问世之后,人们就注意到了 p-n 结的温度特性,随着温度的升高, p-n 结反向电流加大,正向压降减小,它是引起晶体管电路温度漂移的主要原因。从五十年代到现在,人们一直在从器件与线路两个方面努力克服这种影响。另一方面,一切与温度有关的物理过程又都可以利用来测量温度。利用 p-n 结测温,从六十年代开始引起了人们的兴趣^[1],七十年代逐渐在一些测量控制系统中获得应用。由于它兼有热敏电阻、热电偶和铂电阻的某些优点:线性度好、灵敏度高、输出阻抗低、温度范围较宽,正在发展成为一门新的测温技术。本文将从 p-n 结中的物理过程分析这种温度传感器的原理和特点,提出传感器的设计思想。

p-n 结的许多参数都会随着温度变化,对于一定的反向电压, p-n 结反向电流随温度呈指数规律变化。如果保持正向压降不变,正向电流也随温度呈指数规律变化。这两种变化由于明显的非线性,对于仪表的校准和控制系统的调节都非常不方便,在实际上并不利用它们。然而,当正向电流不变时, p-n 结的正向压降随着温度近似线性变化。现代的 p-n 结温度传感器无例外地都利用正向压降来测量温度。

对于一个理想的 p-n 结,正向电流 I 的表达式如下^[2]:

$$I = I_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1), \quad (1)$$

其中 k ——玻耳兹曼常数, T ——绝对温度, V ——正向压降, q ——电子电荷(绝对值), I_0 ——p-n 结反向饱和电流。

I_0 是温度的函数,在半导体材料杂质全部电离、在本征激发可以忽略的条件下,

$$I_0 = f(T) e^{-\frac{qV_g}{kT}} \quad [3],$$

其中 V_g 为半导体材料禁带宽度, $f(T)$ 是一个温度的缓变函数。对于普通掺杂情况, $f(T) = AT^M$, A 是一个与温度无关的常数,与 p-n 结面积和杂质浓度有关。 M 是一个与材料有关的指数。将上述各量代入(1)式,得

$$I = AT^M e^{-\frac{qV_g}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1).$$

当 $T = 300\text{K}$ 时, $\frac{kT}{q} \approx 26\text{mV}$, 当 $V \gg 26\text{mV}$ 时上式简化为

$$I = AT^M e^{\frac{q}{kT}(V - V_g)}. \quad (2)$$

V_g 也是一个随温度变化的量: $V_g = V_{g0} + \beta T$, 其中 V_{g0} 为绝对零度时的禁带宽, β 为禁带宽度温度系数。将 V_g 代入(2)式,则得

$$I = AT^M e^{\left[\frac{q}{kT}(V - V_{g0}) - \frac{q\beta}{k}\right]},$$

两边取对数得

$$\begin{aligned} V &= \left(\frac{k}{q} \ln \frac{I}{A} + \beta\right) T + V_{g0} - \frac{Mk}{q} T \ln T \\ &= V_1 + V_2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$V_1 = \left(\frac{k}{q} \ln \frac{I}{A} + \beta\right) T + V_{g0},$$

$$V_2 = -\frac{Mk}{q} T \ln T.$$

这就是 p-n 结正向压降作为正向电流与温度的函数表达式。当 I 为常数时(利用恒流源