

PTC 热敏半导体的应用

陈光增
(福州大学物理系)

摘 要

本文主要叙述 PTC (positive temperature coefficient) 热敏半导体的特性和应用。首先简述 PTC 效应的物理基础和结构模型;其次讨论了 PTC 热敏半导体所具有的独特性能:电阻温度特性、电压电流特性、电流时间特性以及放热特性等;最后介绍了它在传感器、家用电器以及恒温发热体方面的应用。

自从六十年代中期 Heywang^[1] 对钛酸钡半导体的 PTC 效应提出最初的理论解释之后, PTC 热敏半导体作为温度敏感元件已有许多实际应用。近十多年来, PTC 效应的机理得到进一步发展,材料与工艺逐步改善, PTC 热敏半导体的应用领域不断扩大。目前,利用 PTC 材料的独特性质,已制成具有温度传感、无触点开关、限流保护、过热保护、温度补偿、时间延迟以及恒温发热等各种功能元器件,在国民经济和科学研究的许多领域中获得广泛应用。

一、PTC 效应

一般半导体具有负温度系数或 NTC (negative temperature coefficient 的缩写) 特性,即随着温度的上升,电阻率会减小。但是,人们后来发现了另一类半导体,它在某一温度区域,随着温度的上升,电阻率反而增大,即具有正温度系数。

钛酸钡 (BaTiO_3) 是人们熟知的铁电体,其常温电阻率在 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 以上,故为绝缘体。但是,如果在 BaTiO_3 中掺入微量(约 0.1 ~ 0.3%) 的稀土类金属氧化物,经过高温烧结后,形成常温电阻率为 $0.1 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ 的 n 型半导体。它在某一温度 T_c (居里点) 附近,电阻率从负温度系数转变为正温度系数,且电阻率急剧增大 $10^3 \sim 10^7$ 倍。正因为这种材料的电阻值

物理

随温度敏感变化,并且具有正温度系数,故称 PTC 热敏半导体,其典型特性如图 1 所示。

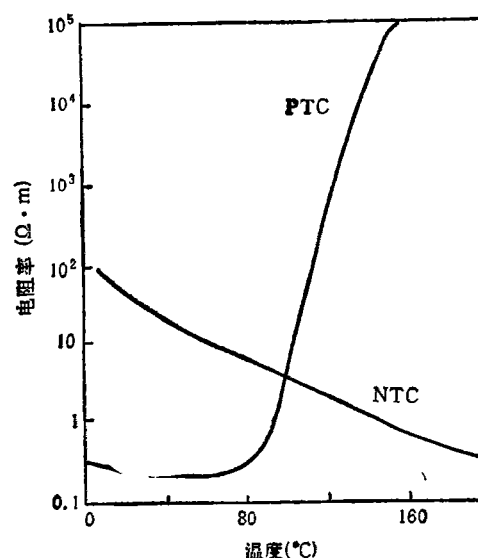


图 1 PTC 热敏半导体的电阻温度特性

上述 BaTiO_3 半导体具有的这种在居里点附近呈现出电阻率正温度系数,并随着温度升高产生电阻率急剧增大的现象,称为 PTC 效应。

PTC 热敏半导体具有多晶结构(晶粒尺寸约为 $3 \sim 100 \mu\text{m}$),各晶粒内部为半导体区,晶界为高阻层区(铁电性)。当样品外加电压时,电压大部分降落在高阻的晶界层上,因而电子通过晶界时的行为将对材料的导电性能起决定性作用。PTC 效应的本质可用晶界势垒模

型^[4,5]作初步解释,根据这一模型,晶界存在一个势垒,当温度在居里点 T_c 以下时,高阻的晶界具有铁电性,介电常数极大,故势垒高度很小,电子很容易越过势垒[如图 2(a)],相应于材料的电阻率小。在温度高于居里点 T_c 时,高阻层发生晶格结构转变,同时铁电性消失,介电常数急剧减小,势垒随之急剧增高,因而电子难于越过势垒[图 2(b)],相应于材料的电阻率急剧上升。

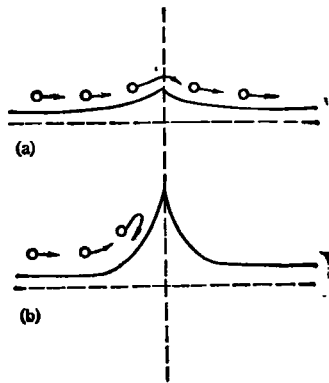


图 2 PTC 效应的定性解释
(a) 温度在居里点以下; (b) 温度在居里点以上

二、特 性

1. 电阻-温度特性^[3,4]

PTC 热敏半导体的电阻温度特性如图 1 所示。在室温至居里点 T_c 以下的一段温度范围内,它表现出和一般半导体相同的 NTC 特性,变化趋势服从 $e^{\Delta E/2KT}$ 规律, ΔE 值约在 0.1~0.2eV 范围。从居里点附近开始,电阻率急剧上升,约增大 $10^3 \sim 10^7$ 倍,电阻率在某一温度附近达到最大值,这个区域为 PTC 区。其后电阻率又以 $e^{\Delta E/2KT}$ 表示的 NTC 特性变化, ΔE 约在 0.8~1.5eV 范围。

PTC 热敏半导体的特点之一是它的居里点 T_c 可以通过掺杂来控制。因为 T_c 是 $BaTiO_3$ 的铁电相变温度,适当掺杂后可以改变 T_c 。例如,已知 $PbTiO_3$ 的 T_c 为 490℃,故在 $BaTiO_3$ 中掺入 Pb 后可使 T_c 向高温方向移动;相反地,如在 $BaTiO_3$ 中掺加 Sr 或 Sn 等元素

后,可以使 T_c 向低温方向移动,因而可根据需要调整 T_c 。实验上 T_c 的移动范围约在 -100~+400℃,然而由于工艺等原因,实际上 T_c 的移动范围约在 -50~+300℃。

表征 PTC 热敏半导体电阻温度特性的参数除了居里点 T_c 外,尚有电阻温度系数 α 和常温电阻率 ρ_s 。

温度为 T 时的电阻温度系数定义为

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT},$$

式中 R 是该温度时的电阻值。设在工作温度范围内温度 T_1 和 T_2 对应的电阻值为 R_1 和 R_2 ,可将这一段电阻-温度特性曲线看作是直线,则

$$\log R = AT + B,$$

式中 A, B 为常数,可得到

$$\ln R = 2.303 \log R = 2.303(AT + B),$$

故

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = 2.303A,$$

即

$$\alpha = 2.303 \frac{\log(R_2/R_1)}{T_2 - T_1}.$$

由于掺杂元素对电性能的影响, α 值与 T_c 有关。一般 α 值在 3~40%/℃ 范围。PTC 元件如作为温度传感器,则要求 α 有较大的值,但当 $T_c < 50^\circ\text{C}$ 或 $T_c > 200^\circ\text{C}$ 时, α 值下降较多,在这种情况下要使 α 值达到 20%/℃ 是困难的^[5]。

实际应用中的另一个重要参数是常温电阻率 ρ_s , ρ_s 值也与 T_c 有关。当 T_c 为 120℃ 时, ρ_s 值可在 $10^{-1} \sim 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 范围;但当 $T_c < 0^\circ\text{C}$ 或 $T_c > 150^\circ\text{C}$ 时,要使 ρ_s 值小于 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 是较为困难的^[5]。PTC 热敏半导体元件在某温度下的电阻值是其常温电阻率 ρ_s 及元件的形状有关。早期的 PTC 材料的 ρ_s 值为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 左右,且最高电阻率与最低电阻率比仅为 10^3 。近年来,由于材料质量的改进,可以做到 $\rho_s < 0.5 \Omega \cdot \text{m}$,且电阻率比可高达 10^7 。

2. 电压-电流特性

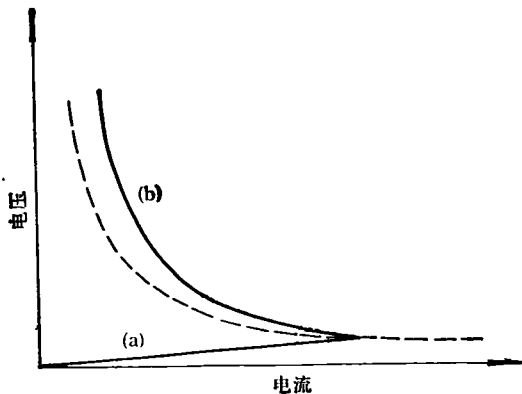


图3 PTC 热敏半导体元件的电压-电流特性

PTC 热敏半导体的 $R-T$ 曲线中存在着电阻率反常特性,因此它也具有独特的静态 $V-I$ 特性,如图3所示。当电压很小时,尚不足以加热样品至居里点温度,这时电流几乎随着电压的增加而正比例增大(图3中 a 段)。当电压增加到某一值时,PTC 元件的温度达到 T_c ,这时电流达到最大值。再进一步增大电压,就会使 PTC 元件的温度超过 T_c ,这时电阻迅速增大,电流减小,如图3中的 b 段。由此可见,随着电压的增大,电流则反比例地减小,此时电压-电流特性曲线接近于恒功率情况下的抛物线(图3中的虚线)。这是由于 PTC 元件趋向于维持在 T_c 温度,在稳定状态时,输入功率与耗散功率相等,为了维持恒定功率,当电压增加时,电流将反比例减小。PTC 元件 $V-I$ 曲线的特殊形状是与它特殊的 $R-T$ 特性相联系的。

3. 电流-时间特性

电流时间特性是指非平衡的暂态过程中电流随时间变化规律。当 PTC 元件加上电压时,通过元件的初始电流 I_0 很大,经过时间 t_0 后,PTC 元件的温度达到 T_c ,电流即迅速降至稳定值。初始电流 I_0 与延迟时间 t_0 取决于 PTC 元件的热容量、电阻值、热交换条件、负载电阻以及所加的电压值。

4. 放热特性

根据不同用途,PTC 热敏元件有各种形状。例如,作为温度传感器时通常做成圆盘形;

作发热体时,则除了圆盘形外,还有平板形、口琴形和蜂窝形等。

当 PTC 元件通过一定电流时,由于功耗其本身将发热,同时向周围环境散发一部分热量。在稳定状态,从 PTC 元件表面放出的热能 P 为

$$P = c(T - T_e),$$

式中 T 为 PTC 样品表面温度, T_e 为环境温度, c 为放热系数。 c 可用下式表示:

$$c = c_0(1 + h\sqrt{v}),$$

式中 v 为风速; c_0 为 $v = 0$ 时的 c 值,它主要取决于 PTC 元件的有效表面积,面积愈大, c_0 也愈大; h 是与 PTC 元件形状有关的常数。因此,放热特性与样品的几何形状、表面积、风速、材料导热性能以及环境温度等因素有关。

三、应 用^[5,6]

近十多年来,PTC 热敏半导体广泛应用于从工业自动化到日常生活的各个领域,这里仅简单介绍其典型应用实例。

1. 传感器

PTC 热敏元件适用于作温度传感器,特别是在需要检测和指示一个预定温度的情况下,使用 PTC 元件比使用 NTC 元件更为合适。因为剧变点的电阻温度系数大,从而能够获得高的电压输出,并能允许一定程度的阻值误差。

利用 PTC 元件与负载串联,可以构成负载(如电动机)的过热保护装置,如图4(a)所示。其优点是不需要附加电子电路就能够直接地自动控制电路中的电流,达到防止过热的目的,工作原理如图4(b)所示。当 PTC 传感器工作在常温(25°C)时,它的电阻很小,工作点在图中的 A 点;若环境温度增加到高于 T_c (例如 $T_e = 75^\circ\text{C}$),PTC 元件的电阻很大,工作点将移动至 B 点。这时大部分电压降落在 PTC 元件上,电路中电流显著减小,因而使负载冷却下来。其后由于 PTC 元件的自热作用,其工作点仍然保持在 B 点附近,直至电路中电压撤除为止。

PTC 元件还可以作为气流和液位传感器。

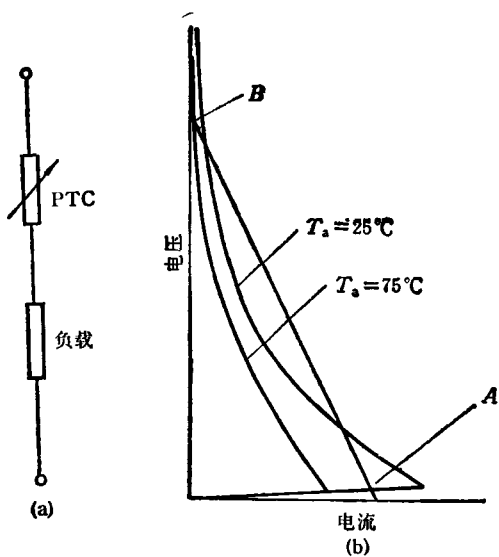


图4 PTC 元件作为过热保护装置
(a) 电路连接; (b) 工作特性

当气流变化时, PTC 元件的放热系数变化, 导致 $V-I$ 曲线的 PTC 区改变, 因而可以检测气流的变化。与此类似, 当 PTC 元件作液位传感器使用时, 由于有无液体时 PTC 元件的放热情况不同, 因此可以检测液位。

2. 限流器、消磁器、起动机

PTC 元件在各种电子设备和家用电器中有着极为广泛的应用。例如, 它可用于各种家用电器的限流器, 彩色电视机的消磁器, 电冰箱压缩机的起动机等。

将 PTC 元件与负载串联, 就可构成限流器。在正常情况下, PTC 元件允许流过某一安全的电流, 如因某种故障, 电路中流过反常大电流, 由于 PTC 元件的自热作用, 其阻值将大大增加, 故能限制通过负载的电流。在电子设备的电源电路中串联一个 PTC 元件, 若发生故障使负载短路时, 由于 PTC 元件的抑制作用, 仍能使负载电流保持一定, 从而防止烧毁电源。PTC 限流器的作用类似于保险丝或断路器, 但无触点, 且能自动复原。

利用 PTC 元件的延迟特性可制成彩色电视机的自动消磁器。彩色电视机显象管的荫罩和其他金属件容易受地磁和外界各种杂散磁场的磁化, 这将会使电子束弯曲而导致色纯度和

聚焦不良, 影响图象质量。所以, 各类彩色电视机内部都装有一套自动消磁电路, 进行经常性的自动消磁, 如图 5(a) 所示。实际使用时是将消磁线圈 L 装在显象管的屏蔽罩上, 并将 PTC 元件与 L 串联。在电视机接通电源的瞬间, PTC 元件的阻值很低, 流过的浪涌电流很大,

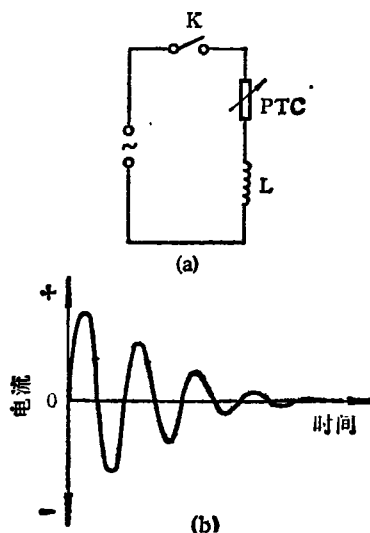


图5 彩色电视机的自动消磁
(a) 自动消磁电路;
(b) 消磁线圈中浪涌电流的下降趋势

在 L 中产生很强的交变磁场, 其磁动势常高达 $500 \sim 1000A$ 。随着大电流的通过, PTC 元件的温度很快升高, 电流随之迅速减小。消磁线圈中浪涌电流的变化如图 5(b) 所示, 产生的交变磁场亦以同样的趋势变化, 从而有效地实现消磁。

利用 PTC 热敏半导体特殊的电阻温度特性还可制成电冰箱压缩机起动机。家用冰箱压缩机电动机一般为单相感应电动机, 起动时是利用主线圈电流和辅助线圈电流的位相差驱动转子转动的, 利用 PTC 元件作为压缩机起动器的电路如图 6 所示。

PTC 起动机和电容器 C_2 串联, 刚接通电源时, PTC 起动机处于阻值很低的导通状态, 此时 C_1 和 C_2 并联使电容值增大, 因而获得起动转矩大和起动电流小的效果。其后 PTC 起动机自身发热, 当达到居里点时阻值很大, 电

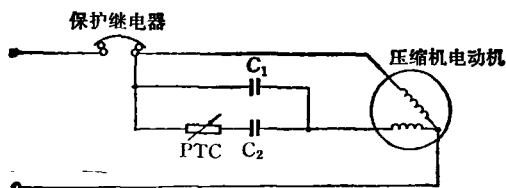


图6 利用 PTC 起动器的压缩机起动电路

流急剧减小, PTC 起动器处于关断状态, 故在压缩机运转过程中, 由于 PTC 起动器关断状态使起动电容器电路断开, 只有电容器 C_1 接在电路上, 从而获得大的输出功率。实际上, PTC 起动器在电路中起着无触点开关的作用, 它具有无触点起动、防爆安全、高可靠性等优点。

3. 恒温发热体

近年来, PTC 热敏半导体已大量用作发热体。PTC 发热体刚接通电源时阻值低, 因而功率很大, 发热迅速。当温度接近居里点附近, 由于电阻增大电流急剧减小, 其后仅需保持预定温度所需的功率。它具有发热快、节能和安全等优点, 是一种较为理想的新型发热体。

小功率 PTC 发热体一般为圆盘形, 使用数只可以获得 30~50W 的功率, 适用于电子恒温槽、卷发器等。

在一定的环境条件下, PTC 发热体的耗散功率与其表面温度和表面积成正比, 由于温

(上接第 740 页)

比较各三束点的数据, 并结合最优选择和结构因子的串联扩展, 就能定出一大批结构因子的符号^[17], 从而可由 (1) 式计算出电子密度分布函数, 完成结构测定。

目前用三光束动力学效应获得相位信息的研究相当活跃^[20]。它已能对中等复杂的中心对称晶体进行结构测定, 至于非中心对称晶体或复杂有机晶体的衍射相位如何获得已提到日程。据称^[2], 利用同步辐射发出的高强度、高均匀、高准直、偏振化的 X 射线束有助于解决这个问题。

- [1] 周公度, 晶体结构测定, 科学出版社, (1981), 156.
- [2] Search and Discovery, *Physics Today*, 35-11 (1982), 17.
- [3] E. Wagner, *Z. Phys.*, 21(1920), 632.
- [4] M. Renninger, *Z. Phys.*, 106(1937), 141.

度自调作用, 其表面温度通常维持在居里点附近。虽然实验上可制作 $T_c > 300^\circ\text{C}$ 的 PTC 发热体, 但由于工艺上的困难, 实用上通常是 $T_c < 300^\circ\text{C}$ 。用提高 T_c 来增大功率从经济效益考虑不一定可取, 要使 PTC 发热体大功率化, 最有效的方法是增大其表面积。在 PTC 发热体发展的初期阶段, 用数只 PTC 片和数只散热板的组合可获得 100W 以上的功率。近年来已不使用金属散热板, 而是把 PTC 发热体做成蜂窝状或口琴状, 大大增加了表面积, 在适当的条件下, 每只蜂窝状 PTC 发热体的发热功率可达 300W。用这种大功率 PTC 发热体制作的衣被、茶叶、粮食烘干机和暖房机等产品广泛应用于各个部门。

可以预期, 随着 PTC 热敏半导体材料的多样化和性能的改进, 它在各个领域必将获得越来越广泛的应用。

- [1] W. Heywang, *J. Am. Ceram. Soc.*, 47(1964), 484—490.
- [2] P. Gerthsen and B. Hoffmann, *Solid-State Electron.*, 16(1973), 617.
- [3] H. Ihrig and W. Puschert, *J. Appl. Phys.*, 48(1977), 3081.
- [4] B. Hoffmann, *J. Appl. Phys.*, 50(1979), 1156.
- [5] Shigetaka Wada, *J. Electron. Eng.*, 16-3 (1979), 66—69.
- [6] E. Roess, *Electron. Prod. Des.*, 5-6 (1984), 179—185.
- [5] W. N. Lipscomb, *Acta Cryst.*, 2(1949), 193.
- [6] K. Kamble, *J. Jap. Phys. Soc.*, 12(1957), 13.
- [7] R. S. Williamson, Thesis, Polytechnic Institute of Brooklyn, (1957).
- [8] M. Hart, A. R. Lang, *Phys. Rev. Lett.*, 7(1961), 120.
- [9] P. P. Ewald, Y. Heno, *Acta Cryst.*, A24(1968), 5; Y. Heno, P. P. Ewald, *Acta Cryst.*, A24(1968), 16.
- [10] B. Post, *Phys. Rev. Lett.*, 39(1977), 12; *Acta Cryst.*, A35(1979), 17.
- [11] P. P. Gong, B. Post, *Acta Cryst.*, A39(1983), 719.
- [12] J. Ladell, Am. Cryst. Assoc. Meet. Cairthersberg, Maryland, Abstract M8.
- [13] R. Collela, *Acta Cryst.*, A30(1974), 413.
- [14] L. D. Chapman et al., *Phys. Rev. Lett.*, 46(1981), 1578.
- [15] H. Juretschke, *Phys. Rev. Lett.*, 48(1982), 1487.
- [16] S. L. Chang, *Phys. Rev. Lett.*, 48(1982), 163.
- [17] F. S. Han, S. L. Chang, *Acta Cryst.*, A39(1983), 98.
- [18] P. Main et al., Code MULTAN-80, Univ. of York, (1980).
- [19] M. M. Woolfson, An Introduction to X-ray Crystallography, Cambridge Univ. Press, (1978), 118, 300.
- [20] B. Post, W. Kiszynick, *Acta Cryst.*, A43(1987), 568.