

实验 30 PN 结温度传感器特性

早在 20 世纪 60 年代初，人们就试图用 PN 结正向压降随温度升高而降低的特性作为测温元件，由于当时 PN 结的参数不稳定，始终未能进入实用阶段。随着半导体工艺水平的提高以及人们不断地探索，到 20 世纪 70 年代时，PN 结以及在此基础上发展起来的晶体管温度传感器，已成为一种新的测温技术应用于许多领域了。

常用的温度传感器有温差电偶、测温电阻器和热敏电阻等，这些温度传感器均有各自的优点，但也有它的不足之处。如温差电偶适用温度范围宽，但灵敏度低、线性差且需要参考温度；热敏电阻灵敏度高、热响应快、体积小，缺点是非线性，这对于仪表的校准和控制系统的调节均感不便；测温电阻器如铂电阻虽有精度高、线性好的长处，但灵敏度低且价格昂贵。而 PN 结温度传感器具有灵敏度高、线性好、热响应快和轻巧等特点，在温度测量数字化、温度控制以及用微机进行温度实时信号处理等方面，乃是其他温度传感器所不能相比的。目前结型温度传感器主要以硅为材料，原因是硅材料易于实现功能化，即将测温单元和恒流、放大等电路组合成一块集成电路。美国 Motorola 公司在 1979 年就开始生产测温晶体管及其组件。如今灵敏度高达 $100\text{mV}/^\circ\text{C}$ 、分辨率不低于 0.1°C 的硅集成电路温度传感器也已问世。但是以硅为材料的这类温度传感器也不是尽善尽美的，在非线性不超过标准值的 0.5% 的条件下，其工作温度一般为 $-50^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ ，与其他温度传感器相比，测温范围的局限性较大。

【预习重点】

- (1) PN 结温度传感器原理。
- (2) 改善 PN 结温度传感器线性度的基本方法。

【实验目的】

- (1) 了解 PN 结温度传感器的应用
- (2) 理解 PN 结温度传感器的测量原理
- (3) 掌握 TH-J 型 PN 结特性仪的使用方法

【实验仪器】

TH-J 型 PN 结 $U_F \sim T$ 特性测试仪、广口杜瓦瓶、冰块。

【实验原理】

1) PN 结的温度特性

理想 PN 结的正向电流 I_F 和正向压降 U_F 存在如下近似关系：

$$I_F = I_S \exp\left(\frac{eU_F}{kT}\right) \quad (30-1)$$

其中： e 为电子电荷； k 为玻尔兹曼常数； T 为绝对温度； I_S 为反向饱和电流。 I_S 是一个和 PN 结材料的禁带宽度 $E(0) = eU_S(0)$ 以及温度等有关的系数，可以证明

$$I_S = CT^\gamma \exp\left[-\frac{eU_S(0)}{kT}\right] \quad (30-2)$$

式中： C 、 γ 是与结面积、掺杂浓度有关的常数； $U_S(0)$ 为绝对零度时 PN 结材料的导带底和价带顶的电势差。

将式 (30-2) 代入式 (30-1)，且两边取对数可得

$$U_F = U_S(0) - \left(\frac{k}{e} \ln \frac{C}{I_F}\right) T - \frac{kT}{e} \ln T^\gamma = U_1 + U_{n1} \quad (30-3)$$

其中 $U_1 = U_S(0) - \left(\frac{k}{e} \ln \frac{C}{I_F}\right) T$ ； $U_{n1} = -\frac{kT}{e} \ln T^\gamma$ 。

由式 (30-3) 是 PN 结温度传感器的基本方程。令 $I_F = \text{常数}$ ，则正向压降只随温度而变。由式 (30-3) 可以看出 U_1 为线性项， U_{n1} 为非线性项。实验结果证明，当 I_F 较小时（通常取 I_F 为 $20 \sim 100 \mu\text{A}$ ）非线性部分受温度变化的影响相对于线性部分而言变化量是很小的。另外，TH-J 型 PN 结特性测试仪采用电流函数发生器，使 I_F 比例于 T^γ 可消减非线性部分的影响。

略去非线性项，式（30-3）可写成

$$U_F(T) = U_S(0) + S \cdot T \quad (30-4)$$

$S(S < 0)$ 为PN结随温度变化的灵敏度, $S = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$, 即温度每升高 1°C , U_F 减小约 2.3mV 。

式（30-4）是PN结温度传感器的测温原理，

2) PN结禁带宽度的测量

如前所述，当正向电流 I_F 恒定时，式（30-4）可写为

$$U_S(0) = U_F(T_R) - S \cdot T \quad (30-5)$$

若温度从室温 t_0 开始上升，则式（30-5）又可写为

$$U_S(0) = U_F(T_R) - S \cdot T_R \quad (30-6)$$

其中 $T_R = T_0 + t_0$

$$\text{PN结禁带宽度: } E(0) = eU_S(0) \quad (\text{公认值 } E(0) = 1.21\text{eV}) \quad (30-7)$$

用实验的方法测出PN结的温度传感系数灵敏度 S ，即可求得PN结的禁带宽度。

【实验内容及要求】

1) 测量PN结温度传感器的正向伏安特性

将样品室埋在盛有冰水（少量水）的杜瓦瓶中降温（也可以从室温开始），开启测试仪。待温度冷却至 0°C 时，将“测量选择”开关（以下简称K）拨到 I_F ，由“ I_F 调节”使 $I_F = 30\mu\text{A}$ 。K拨到 U_F ，记下 U_F 值，再将K置于 ΔU ，由“ ΔU 调零”使 $\Delta U = 0$ 。改变 I_F 为40、50、60、70、80、90、100 μA ，分别记录对应的 U_F 值，作 $I_F \sim U_F$ 曲线，说明曲线表示的意义。

2) 测绘 $\Delta U \sim t$ 曲线。

(1) 将 I_F 调整为 $50\mu\text{A}$ ，记录初始温度和对应的 $U_F(T_R)$ 值

(2) 保持 I_F 恒定 $50\mu\text{A}$ 。将开关 K 倒向 ΔU ，并调节 $\Delta U = 0$ 。开启加热电源，加热电流为 $0.3\sim 0.4\text{A}$ ，在温度缓慢上升时，观察 ΔU 的变化。当 ΔU 改变 10mV 时，立即读出温度 t ，后续的测量是 ΔU 每改变 10mV 记录当时的温度 t ，直到温度升高至 110°C 止。以温度 t 作横坐标， ΔU 为纵坐标，作出 $\Delta U\sim t$ 曲线。求直线斜率 K ，即为灵敏度 S ($S < 0$)。

3) 计算 PN 结的禁带宽度并与公认值比较，求相对百分差。

【拓展与设计】

测量 PN 结的扩散电流与电压的关系，求玻尔兹曼常数。

附录 30-1 TH-J 型 PN 结 $U_F \sim T$ 特性测试仪

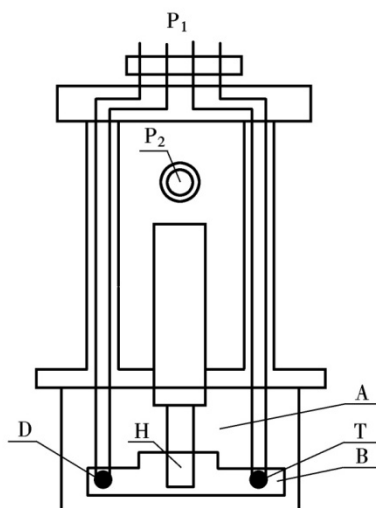


图 30-1 样品架结构

A-样品室；B-样品座；D-待测 PN 结；T-测温元件；H-加热器； P_1 -PN 结样品和测温元件引线插座； P_2 -加热电源插孔

实验系统由样品架和测试仪两部分组成。样品架的结构如图 23-1 所示，其中 A 为样品室，是一个可卸的筒状金属容器，筒盖内有 O 型橡皮圈，盖与筒套螺纹旋紧保持密封。待测 PN 结样品 D（采用 3DG6 晶体管的基极与集电极短接作为正极，发射极作为负极，构成一只二极管）和测温元件 T（AD590）均置于铜座 B 上，其管脚通过高温导线分别穿过两旁空芯细管与顶部插座 P_1 连接。

加热器 H 装在中心管的支座下，其发热部位埋在铜座 B 的中心柱体内，加热电源的进线由中心管上方的插孔 P_2 引出， P_2 和引线（外套瓷管）与容器绝缘，容器为电源负端，通过插座 P_1 的专用线与测试仪机壳相连接地，并将被测 PN 结的温度和电压信号输入测试仪。

测试仪由恒流源、基准电源和显示等单元组成。恒流源有两组，其中一组提供 I_F ，其电流输出范围为 $0 \sim 1000 \mu\text{A}$ 连续可调，另一组用于加热，其控温电流为 $0.1\text{A} \sim 1\text{A}$ ，分为 10 挡，逐挡递增或递减。基准电源分为两组。一组用于补偿被测 PN 结在 0°C 或室温 T_R 时的正向压降 $U_F(273\text{K})$ 或 $U_F(T_R)$ ，可通过设置在面板上的“ ΔU 调零”电位器实现 $\Delta U = 0$ ，并满足：

若升温, $\Delta U < 0$; 若降温, $\Delta U > 0$, 以表明正向压降随温度升高而下降。另一组基准电源用于温标转换和标准, 因本实验采用 AD590 温度传感器测温, 其输出电压以 1mV/K 正比于绝对温度, 它的工作温度范围为 $281.2\sim 423.2\text{K}$ (即 $-55\sim 150^\circ\text{C}$), 相应输出电压为

$281.2\sim 423.2\text{mV}$ 。这就要求配置一组 $4\frac{1}{2}$ 位的数码显示器。为了简化电路而又保持测量精度, 设置了一组 273.2mV (相当于 AD590 在 0°C 时的输出电压) 的基准电压, 其目的是将上述绝对温标转换成摄氏温度, 则对应于 $-55\sim 150^\circ\text{C}$ 的工作温区内, 输出显示单元的电压为

$-55\sim 150\text{mV}$ 。便可采用量程为 200.0mV 的 $3\frac{1}{2}$ 位数码显示器进行温度测定。另一组量程为

$\pm 1000\text{mV}$ 的 $3\frac{1}{2}$ 位数码显示器用于测量 I_F 、 U_F 和 ΔU , 通过“测量选择”开关来实现。

此外, 仪器设有 U_T (温度数字量) 和 ΔU 的输出口, 可供 XY 函数记录仪使用。测量的框图如 30-2 所示。

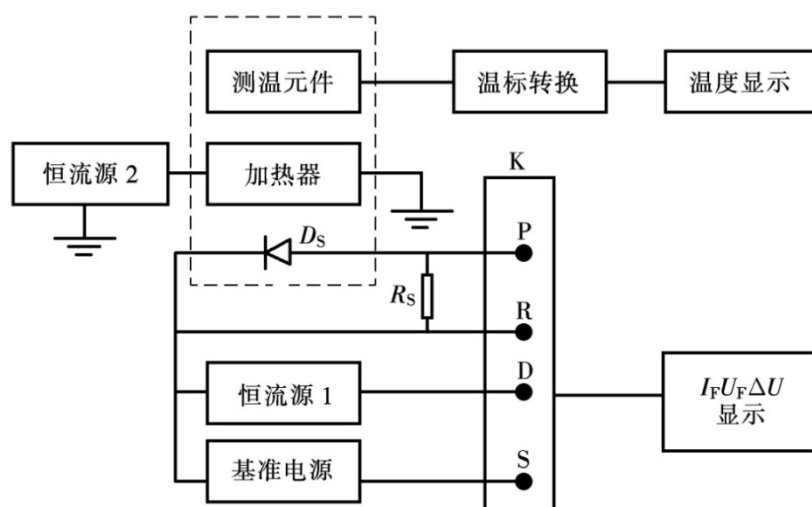


图 30-2 PN 结 $U_F \sim T$ 特性测试框图

D_S 为待测 PN 结, R_S 为 I_F 的取样电阻; 开关 K 起测量选择与极性变换作用, 其中 R、P 测 I_F ; P、D 测 U_F ; S、P 测 ΔU 。