

实验 34 PN 结正向压降与温度关系的研究

常用的温度传感器有热电偶、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。如热电偶适用温度范围宽, 但灵敏度低、线性差且需要参考温度; 热敏电阻的灵敏度高、热响应快、体积小, 缺点是非线性, 且一致性较差, 这对于仪表的校准和调节很不方便; 测温电阻如铂电阻有精度高、线性好的优点, 但是灵敏度低且价格较贵; 而 PN 结温度传感器具有灵敏度高、线性好、热响应快和体积小轻便等特点, 尤其是在温度数字化、温度控制以及用微机进行温度实时讯号处理等方面, 乃是其它温度传感器所不能相比的, 所以其应用势必日益广泛。但是这类温度传感器的工作温度一般为 $-55^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$, 与其它温度传感器相比, 测温范围的局限性较大, 有待于进一步的改进和开发。

【实验目的】

1. 了解 PN 结正向压降随温度变化的基本关系式。
2. 在恒流条件下, 测绘 PN 结正向压降随温度变化的曲线, 并由此确定其灵敏度和被测 PN 结材料的禁带宽度。
3. 学习用 PN 结测温的方法。

【实验原理】

理想 PN 结的正向电流 I_F 和正向压降 V_F 存在如下近似关系式:

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

式中 q 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, 它是一个与 PN 结材料的禁带宽度以及温度等有关的系数, 可以证明:

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

其中 C 是与结面积、掺质浓度等有关的常数; γ 也是常数; $V_g(0)$ 为绝对零度时 PN 结的导带底和价带顶的电势差。

将 (2) 式代入 (1) 式, 两边取对数可得

$$V_F = V_g(0) - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right) T - \frac{kT}{q} \ln T^r = V_1 + V_{n1} \quad (3)$$

$$\text{其中, } V_1 = V_g(0) - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right) T, \quad V_{n1} = -\frac{kT}{q} (\ln T^r)$$

方程 (3) 就是 PN 结正向压降作为电流和温度函数的表达式, 它是 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化, 但是在方程 (3) 中还包含非线性项 V_{n1} 。下面来分析 V_{n1} 项所引起的线性误差。

设温度由 T_1 变为 T 时, 正向压降 V_{F1} 由变为 V_F , 由 (3) 式可得

$$V_F = V_g(0) - [V_g(0) - V_{F1}] \frac{T}{T_1} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{T}{T_1}\right)^r \quad (4)$$

按理想的线性温度响应， V_F 应取如下形式

$$V_{\text{理想}} = V_{F1} + \frac{\partial V_{F1}}{\partial T} (T - T_1) \quad (5)$$

$\frac{\partial V_{F1}}{\partial T}$ 等于 T_1 温度时的 $\frac{\partial V_F}{\partial T}$ 值。由 (3) 式可得

$$\frac{\partial V_{F1}}{\partial T} = -\frac{V_g(0) - V_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r \quad (6)$$

所以
$$V_{\text{理想}} = V_{F1} + \left[-\frac{V_g(0) - V_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r\right] (T - T_1)$$

$$= V_g(0) - [V_g(0) - V_{F1}] \frac{T}{T_1} - \frac{kT}{q} (T - T_1) r \quad (7)$$

由理想线性温度响应 (7) 式和实际响应 (4) 式相比较，可得实际响应对线性的理论偏差为

$$\Delta = V_{\text{理想}} - V_F = \frac{k}{q} r (T - T_1) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{T}{T_1}\right)^r \quad (8)$$

设 $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_2 = 310 \text{ K}$, 取 $\gamma = 3.4$, 由 (8) 式可得 $\Delta = 0.048 \text{ mV}$, 而相应的 V_F 的改变量约 20 mV , 相比之下, 误差很小。不过当温度变化范围增大时, V_F 温度响应的非线性误差将有所递增, 这主要是由于 γ 因子所致。

综上所述, 在恒流供电条件下, PN 结的 V_F 对 T 的依赖关系取决于线性项 V_{F1} , 即正向压降几乎随温度升高而线性下降, 这就是 PN 结测温的理论依据。

在以上的分析中, 温度 T 是热力学温度, 在实际使用时会有不便之处, 为此, 我们进行温标转换, 采用摄氏温度 t 来表示。即 $T = 273 + t$ 。

令 V_F 在室温时的值为 $V_F(t_R)$, 则在 T_K 时 V_F 的值为:

$$V_F = V_F(t_R) + \Delta V \quad (9)$$

代入公式 (3), 有:

$$V_F(t_R) + \Delta V = V_g(0) + \frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F} (273.2 + t) \quad (10)$$

设温度在 $t_R^\circ \text{C}$ 时, $\Delta V = 0$, 则有:

$$V_F(t_R) = V_g(0) + \frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F} (273.2 + t) \quad (11)$$

$$\text{而对于其它的温度 } t, \text{ 则有: } \Delta V = -\left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right)t \quad (12)$$

定义 S 为 PN 结温度传感器灵敏度, 则有 $\Delta V = -St$

$$\text{或 } t = -\frac{\Delta V}{S} \quad (13)$$

这就是 PN 结温度传感器在摄氏温标下的测温原理公式

必须指出, 上述结论仅适用于杂质全部电离、本征激发可以忽略的温度区间 (对于通常的硅二极管来说, 温度范围约: $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$)。如果温度低于或高于上述范围时, 由于杂质电离因子减小或本征载流子迅速增加, V_F-T 关系将产生新的非线性, 这一现象说明 V_F-T 的特性还随 PN 结的材料而异, 对于宽带材料 (如 GaAs, E_g 为 1.43eV) 的 PN 结, 其高温端的线性区则宽; 而材料杂质电离能力小 (如 InSb) 的 PN 结, 则低温端的线性范围宽。对于给定的 PN 结, 即使在杂质导电和非本征激发温度范围内, 其线性度也随温度的高低而有所

不同, 这是非线性项 V_{nl} 引起的, 由 V_{nl} 对 T 的二阶导数 $\frac{d^2V}{dT^2} = \frac{1}{T}$ 可知, $\frac{dV_{nl}}{dT}$ 的变化与 T 成反比, 所以 V_F-T 的线性度在高温端优于低温端, 这是 PN 结温度传感器的普遍规律。

此外, 由 (4) 式可知, 减小 I_F , 可以改善线性度, 但不能从根本上解决问题, 目前行之有效的方法大致有两种:

1. 利用对管的两个 be 结 (将三极管的基极与集电极短路, 与发射极组成一个 PN 结), 在不同电流 I_{F1} 、 I_{F2} 下工作, 由此获得两者之差 ($V_{F1}-V_{F2}$) 与温度成线性函数关系, 即

$$V_{F1}-V_{F2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{F1}}{I_{F2}} \quad (14)$$

由于晶体管的参数有一定的离散性, 实际值与理论值仍存在差距, 但与单个 PN 结相比, 其线性度与精度均有所提高, 这种电路结构与恒流、放大等电路集成一体, 便构成集成电路温度传感器。

2. 采用电流函数发生器来消除非线性误差。由 (3) 式可知, 非线性误差来自 T^γ 项, 利用函数发生器, I_F 正比于绝对温度的 γ 次方, 则 V_F-T 的线性理论误差 $\Delta=0$ 。实验结果与理论值会比较一致, 其精度可达 0.01°C 。

【实验仪器】

PN 结正向压降温度特性实验仪由两部分组成: 加热测试装置和测试仪, 其实物照片如图 1 所示。

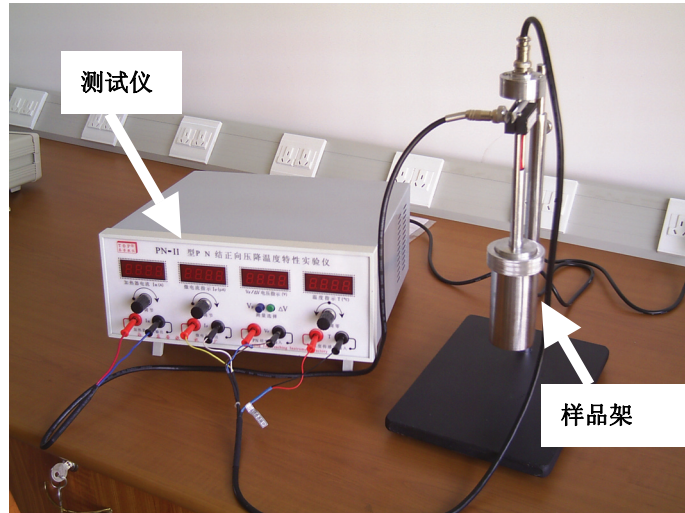


图 1 PN 结正向压降温度特性实验仪

1. 仪器结构及说明

1.1 加热测试装置(样品架)

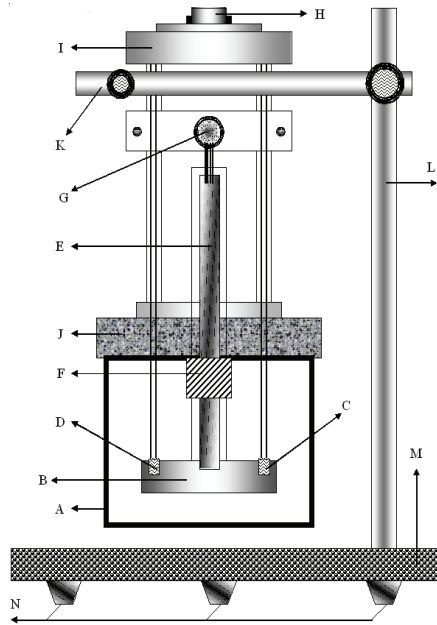


图 2 加热测试装置

A→隔离圆筒 B→测试圆筒块 C→测温元件 D→被测 PN 结 E→加热器
 F→隔离圆柱 G→加热电源插座 H→信号输出插座 I→信号线筒 J→隔离圆筒上盖
 K→固定横杆 L→固定竖杆 M→固定底板 N→装置底脚

如图 2 所示，待测 PN 结和温度传感器均置于测试圆筒块上；加热器装于铜块中心柱体内，通过热隔离后与外壳固定；引线通过高温导线连至顶部插座，再由顶部插座用专用导线连至测试仪；加热器电源插座，接至测试仪的“10”、“11”端。

1.2 测试仪部分

测试仪由恒流源、基准电压和显示等部分组成，原理框图见图 3：

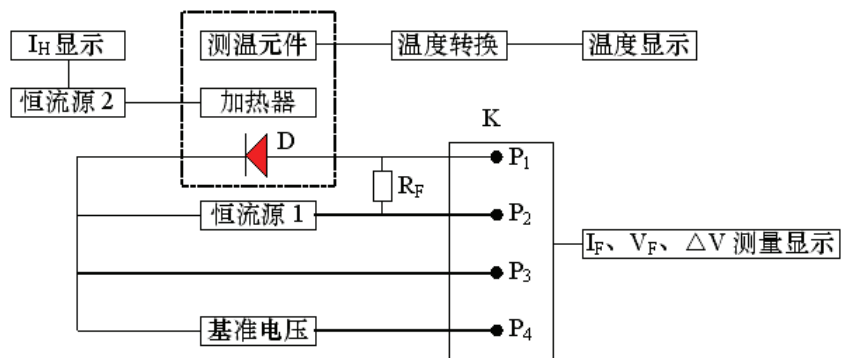


图 3 测试仪原理框图

在图 3 中, D 为被测 PN 结, R_F 为 I_F 的取样电阻, 开关 K 用于选择测量对象和极性变换的作用, 其中 P_1 、 P_2 测量 I_F , P_1 、 P_3 测量 V_F , P_1 、 P_4 测量 ΔV 电压。

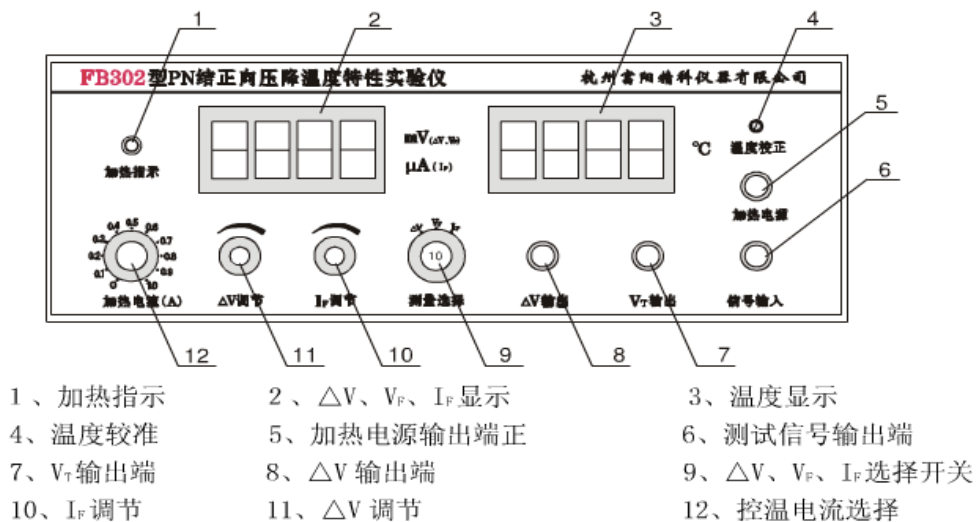


图 4 PN 结正向压降温度特性实验仪测试仪部分

恒流源有两组, 其中“恒流源 1”提供正向电流 I_F , 其电流输出范围为: $0 \sim 1000 \mu\text{A}$, 连续可调; 另外一组“恒流源 2”用于加热, 其控温电流为: $0.001 \sim 1.000 \text{A}$, 连续可调。

基准电压源也有两组, 一组用于补偿被测 PN 结在 0°C 或室温 T_R 时的正向压降 $V_F(0)$ 或 $V_F(T_R)$, 可通过调节在测试仪面板的“ ΔV 调零”电位器“(7)”实现 $\Delta V = 0$, 并满足此时若升温 $\Delta V < 0$, 若降温 $\Delta V > 0$, 则表明正向压降随温度的升高而下降。另一组基准电压源用于温度转换和校准, 因为本实验采用的温度传感器的输出电流以 $1 \mu\text{A}/\text{K}$ 正比于绝对温度, 在 $1 \text{K} \Omega$ 电阻上产生 $1 \text{mV}/\text{K}$ 的输出电压, 范围为 $218.2 \sim 423.2 \text{mV}$, 相应的温度范围为 $218.2 \sim 423.2 \text{K}$ (即 $-55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$)。为了方便的显示该温度, 设置了一组 273.2mV 的基准电压, 经过转换后输出电压变为 $-55 \text{mV} \sim 150 \text{mV}$, 对应于温度 $-55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$, 这样不仅可以用 $3\frac{1}{2}$ 位 LED 数字电压表显示, 而且以 $^\circ\text{C}$ 为单位也符合使用习惯。上述的 PN 结工作电流 I_F 、PN 结电压 V_F 、PN 结电压变化量 ΔV 、加热恒流 I_H , 温度 T 均通过 $3\frac{1}{2}$ 位 LED 数字电压表显示在

测试仪的面板上，以便采集。

【实验内容】

1.实验系统检查与连接

(1) 左手扶隔离圆筒上盖“J”，右手扶隔离圆筒的筒套“A”，取下圆筒的筒套，检查待测PN结管“D”和测温元件“C”应放在测试圆铜块“B”的左右两侧圆孔内，其管脚应不与容器接触，然后套上筒套“A”。注意安装牢靠，固定螺丝要拧紧。

(2) 将测试仪面板上的控温的加热器电流旋钮“5”逆时针旋到底，使加热器电流 I_H 指示“0.000” A，接上加热器电源线和七芯信号传输线。将七芯屏蔽电缆信号线的插头端接至加热测试装置顶部的插座“H”，连接时，应先将七芯插头与七芯插座的凹凸定位槽对准，再按下插头线便可插好。将七芯屏蔽电缆信号线另一端PN结的两组红黑香蕉插头分别接至测试仪面板的“12”“13”“14”“15”插孔，注意红黑要对应好，切勿接错。再将七芯屏蔽电缆信号线另一端的温度传感器输出端的红黑香蕉插头，接至测试仪面板的“16”“17”插孔，注意红黑要对应好，切勿接错。

(3) 将测试仪面板上的加热器电流 I_H 调节旋钮“(5)”和微电流 I_F 调节旋钮“(6)”逆时针旋转到底。

(4) 用随仪器配备的三相电源线将市电接入仪器，并打开测试仪背板的电源开关，电源指示灯应该发光，测试仪面板上的四块LED数字表即有指示，若发现数字表显示的数据不稳定或者溢出，则应检查信号电缆插头是否接好、信号线有无折断、脱焊、虚焊，或检查PN结、测温元件连线是否连接正常。

(5) 将测试仪面板上选择开关K置“(8)”，即显示“ V_F ”的电压，旋转的微电流 I_F 调节旋钮“(6)”，对应的微电流 I_F 指示“(2)”和“ V_F ”应该发生变化；

f.将测试仪面板上选择开关K置“(9)”，即显示“ ΔV ”的电压，旋转 ΔV 调零调节旋钮“(7)”，对应的 ΔV 电压指示应该可使 $\Delta V = 0$ 。

(6) 将加热电源输出信号线的“Q9”端接至加热测试装置的插座“G”，另一端的红黑香蕉插头分别接至测试仪面板的“10”“11”插孔。调节测试仪面板上的加热器电流 I_H 调节旋钮“(5)”，对应的加热器电流 I_H 指示“(1)”应该改变，再将 I_H 调节至“0.000” A。如需改变温度，则对 I_H 进行调节。至此，表明仪器运行正常。

2.实验数据的测量

打开电源开关，预热几分钟后，此时测试仪上的温度表“(4)”将显示出室温 T_R ，记录起始温度 T_R 。

2.1 $V_F(0)$ 或 $V_F(T_R)$ 的测量和调零

本实验的起始温度如需从 0°C 开始，将样品室埋入盛有冰水（少量水）的杜瓦瓶中降温，开启测试仪电源（电源开关在机箱后面，电源插座内装保险丝），预热数分钟后，将“测量选择”开关（以下简称K）拨到 I_F ，调节“ I_F 调节”使 $I_F = 50\mu\text{A}$ ，待温度冷却至 0°C 时，将K拨到 V_F ，记下 $V_F(0)$ 值，再将K置于 ΔV ，调节“ ΔV 调零”使 $\Delta V = 0$ 。

本实验的起始温度 T_S 亦可直接从室温 T_R 开始，按上述步骤，测量 $V_F(T_R)$ 并使 $\Delta V = 0$ 。

2.2.测定 $\Delta V-T$ 曲线

取走冰瓶，开启加热电源（指示灯即亮），逐步提高控温电流进行变温实验，调节测试仪面板上的控温的加热器电流旋钮“5”，逐步提高加热电流 I_H ，并记录对应的 ΔV 和 T ，至于 ΔV 和 T 的数据测量，可按 ΔV 每改变10或15mV立即读取一组 ΔV 、 T ，这样可以减小测量误差。注意：在整个实验过程中，升温速率要慢，且温度不宜过高，最好控制在120℃以内。

2.3.求被测PN结正向压降随温度变化的灵敏度 S （mV/℃）

以温度 T 为横坐标，为 ΔV 纵坐标，作 $\Delta V-T$ 曲线，其斜率就是 S 。

2.4.估算被测PN结材料的禁带宽度 $E_g(0) = qV_g(0)eV$ 。

根据(11)式，可得

$$V_g(0) = V_F(t_R) + S \cdot (273.2 + t_R) \quad (15)$$

将实验所得的 $E_g(0)$ 与公认值 $1.21eV$ 比较，求其误差。

3. 实验数据记录

实验起始温度： $T_R = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

PN结工作电流： $I_F = \underline{\hspace{2cm}}$ uA

T_R 时PN结的正向压降： $V_F(T_R) = \underline{\hspace{2cm}}$ mV

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 初始测量条件：见上文 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 控温电流(A) | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| $\Delta V = V_F(T) - V_F(T_s)$ (mV) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T/℃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $T=(273.2+T)/K$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

【思考题】

- 1.测 $V_F(0)$ 或 $V_F(T_R)$ 的目的何在？
- 2.测 $\Delta V-T$ 曲线为何按 ΔV 的变化读取 T ，而不是按自变量 T 的变化读取 ΔV ？
- 3.在测量PN结正向压降和温度的变化关系时， $\Delta V-T$ 的线性在温度高时好，还是温度低时好？
- 4.测量时，为什么温度必须在 $-50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内？

【注意事项】

- a.仪器的连线较多，芯线也较细，所以在使用时要注意，不可用力过猛。拆除信号线时，应拉插头的可动外套，决不可鲁莽左右转动，或操作部位不对而硬拉，否则可能拉断引线影响实验。
- b.加热装置加热较长时间后，隔离圆筒外壳会有一定的温升，注意安全使用。
- c.本仪器应妥善保存，最好存放温度在 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 之间，相对湿度低于80%，室内空气不应含有腐蚀性气体，仪器应避免在阳光下暴晒，并防止碰倒、摔倒。
- d.实验测量完毕后，要注意将加热电流降至0，仪器使用完毕后，务必关闭电源。

e.仪器的温度测量值，已于校准过，请勿随意调节仪器内部的器件。

附录

1. (2) 式的证明

对于 P⁺N 结 (P⁺指 P 区为重掺杂)，在杂质导电范围内，I_s 的表达式为

$$I_s = AqP_n \left(\frac{D_p}{L_p} \right)$$

其中 A 为面积；P_n 为 N 区的少数载流子（空穴）平均浓度；L_p 为空穴扩散长度；D_p 扩散系数。P_n、L_p 和 D_p 均随温度和材料的掺杂浓度而变化。

根据热平衡公式 $P_n = n_1^2$

n₁ 为本征载流子浓度。把 N 区的少子浓度用掺杂 N_D 来表示，则

$$P_n = \frac{n_1}{N_D} \frac{1}{N_D} \cdot T^3 \exp\left(\frac{E_g(0)}{kT}\right)$$

其中 E_g(0) 为绝对零度时的禁带宽度。

利用 $L_p = \sqrt{D_p \tau} \frac{D_p}{L_p}$ (τ 为少数载流子寿命) 和爱因斯坦关系

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad I_s = CT^x \exp\left[\frac{qV_g(0)}{kT}\right]$$

(μ_p 为空穴迁移率)，将 I_s 化为 T 的函数，则 I_s 可改写成如下形式：

上述内容可参阅黄昆、谢希德著半导体物理。

2. r 的数值取决于少数载流子迁移率对温度的关系，通常取 r=3.4。引自 Advance in instrumentation, ISA 76, Vol.31 part 2。