

# PN 结温度特性与伏安特性的研究

班级 18 级软件 6 班 姓名 乔翱 学号 201811040809

## 一、实验目的

- (1) 了解 PN 结正向电压随温度变化的基本规律；
- (2) 在恒流供电条件下，测绘 PN 结正向电压随温度变化的曲线关系，并由此确定 PN 结的测温灵敏度和被测 PN 结材料的禁带宽度。
- (3) 在恒定温度条件下，测量正向电压随正向电流的变化关系，绘制伏安特性曲线

## 二、实验仪器

PN 结正向特性综合实验仪、温度传感实验装置、样品室、Pt100 温度传感器、PN 结集成温度传感器。

## 三、实验原理

### 1. PN 结的正向特性



图 1 PN 结温度传感器示意图

由半导体物理学可知，理想 PN 结的正向电流  $I_F$  和压降  $V_F$  存在如下关系：

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

式中  $I_F$  是通过 PN 结的正向电流， $I_S$  是反向饱和电流（在温度恒定时为常数）， $T$  是热力学温度， $q$  是电子的电荷量， $V_F$  为 PN 结正向压降。由于在常温 (300K) 时， $kT/q \approx 0.026\text{V}$ ，而 PN 结正向压降约为十分之几伏，则  $\exp(\frac{qV_F}{kT}) \gg 1$ ，因此括号内 -1 项完全可以忽略，于是有

$$I_F = I_S \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) \quad (2)$$

$I_s$  为反向饱和电流，它是一个和 PN 结材料的禁带宽度以及温度等有关的系数，可以证明

$$I_s = CT^r \exp \left[ -\frac{qV_g(0)}{kT} \right] \quad (3)$$

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

将 (3) 式代入 (2) 式，两边取对数可得：

$$V_F = V_g(0) - \left( \frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F} \right) T - \frac{kT}{q} \ln T^r = V_1 + V_{n1} \quad (4)$$

其中，

$$V_1 = V_g(0) - \left( \frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F} \right) T, \quad V_{n1} = -\frac{kT}{q} \ln T^r \quad (5)$$

这就是 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  $I_F$  为常数，则正向压降只随温度而变化，但是在方程(4)中，除线性项  $V_1$  外还包含非线性项  $V_{n1}$  项所引起的线性误差。

设温度由  $T_1$  变为  $T$  时，正向电压有  $V_{F1}$  变为  $V_F$ ，由(4)式得

$$V_F = V_g(0) - [V_g(0) - V_{F1}] \frac{T}{T_1} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{T}{T_1} \right)^r \quad (6)$$

按理想的线性温度影响， $V_F$  应取如下形式：

$$V_{F理想} = V_{F1} - \frac{\partial V_{F1}}{\partial T} (T - T_1) \quad (7)$$

其中， $\frac{\partial V_{F1}}{\partial T}$  等于  $T_1$  温度时的  $\frac{\partial V_F}{\partial T}$  值，将(6)式带入，可得

$$V_{理想} = V_{F1} + \left[ \frac{V_g - V_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r \right] (T - T_1) \quad (8)$$

即

$$V_{理想} = V_g(0) - [V_g(0) - V_{F1}] \frac{T}{T_1} - \frac{k}{q} (T - T_1) r \quad (9)$$

由理想线性温度响应(8)、(9)式和实际响应(6)式相比较，可得实际响应对线性的理论偏差为：

$$\Delta = V_{理想} - V_F = -\frac{k}{q} r (T - T_1) + \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{T}{T_1} \right)^r \quad (10)$$

设  $T_1=300^\circ\text{K}$ ， $T=310^\circ\text{K}$ ，取  $r=3.4$ ，由(10)式可得  $\Delta=0.048\text{mV}$ ，而相应的  $V_F$  的改变量约  $20\text{mV}$ ，相比之下误差甚小。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，这主要由于  $r$  因子所致。

综上所述，在恒定小电流条件下，PN 结的  $V_F$  对  $T$  的依赖关系主要取决于线性项  $V_1$ ，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。

## 2. 求 PN 结温度传感器的灵敏度，测量禁带宽度

由前所述，我们可以得到一个测量 PN 结正向压降  $V_F$  与热力学温度  $T$  关系的近似式：

$$V_F = V_1 = V_g(0) - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right) T = V_g(0) + ST \quad (11)$$

其中， $S$  为 PN 结温度传感器的灵敏度。

用实验的方法测出  $V_F$ - $T$  变化关系曲线，其斜率即为灵敏度  $S$ 。在求得  $S$  后，根据式（11）可知：

$$V_g(0) = V_F - ST \quad (12)$$

从而可以求出温度 0K 时半导体材料的近似禁带宽度  $E_g(0) = qV_g(0)$ 。硅材料的  $E_g(0)$  约为 1.21eV。

## 3. 求玻尔兹曼常数 $k$

对公式(2)取对数，可以得到

$$\ln I_F = \frac{q}{kT} V_F + \ln I_S \quad (13)$$

显然，在温度  $T$  不变的情况下， $\ln I_F$  与  $V_F$  呈线性关系，斜率为  $\frac{q}{kT}$ 。测得不同正向电压  $V_F$  下对应的  $I_F$  值，通过逐差法计算得到直线斜率，进而计算出玻尔兹曼常数  $k$ 。

## 四、实验内容

1. 根据实验原理，连接实验线路。

2. 在恒定温度条件下，测量正向电压随正向电流的变化关系，绘制伏安特性曲线。

设置温度  $t=30^\circ\text{C}$  (303.15K)，待温度恒定后开始实验。调节电流旋钮，使  $I_F$  逐渐增大，正向压降  $V_F$  将随之增大。要求  $V_F$  在 0.450V-0.540V 范围内每变化 0.005V 记录对应的  $I_F$ ，在表 1 中记录数据，绘制伏安特性曲线（ $I_F$ - $V_F$  曲线）。

3. 利用逐差法，计算玻尔兹曼常数  $k$ ，与公认值  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  比较，计算相对误差。

4. 恒定电流条件下，测量正向电压随温度的变化关系。

固定正向电流  $I_F=50\mu\text{A}$ ，测绘 PN 结正向压降  $V_F$  随温度的变化曲线，要求在  $30^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  左右温度范围（温度不宜太高）内每隔  $5^\circ\text{C}$  测量一个点，升温过程和降温过程各测一遍，记录对应的正向电压  $V_F$ ，绘制  $V_F$ - $T$  曲线，并计算灵敏度  $S$ 。

5. 估算被测 PN 结材料的禁带宽度，与公认值  $E_g(0)=1.21\text{eV}$  比较，计算相对误差。

四、原始数据记录

表 1 PN 结伏安特性曲线数据记录表

主要仪器：PN 结正向特性综合实验仪、Pt100 温度传感器、PN 结集成温度传感器  
精度：0.1μA                      温度 t=30℃

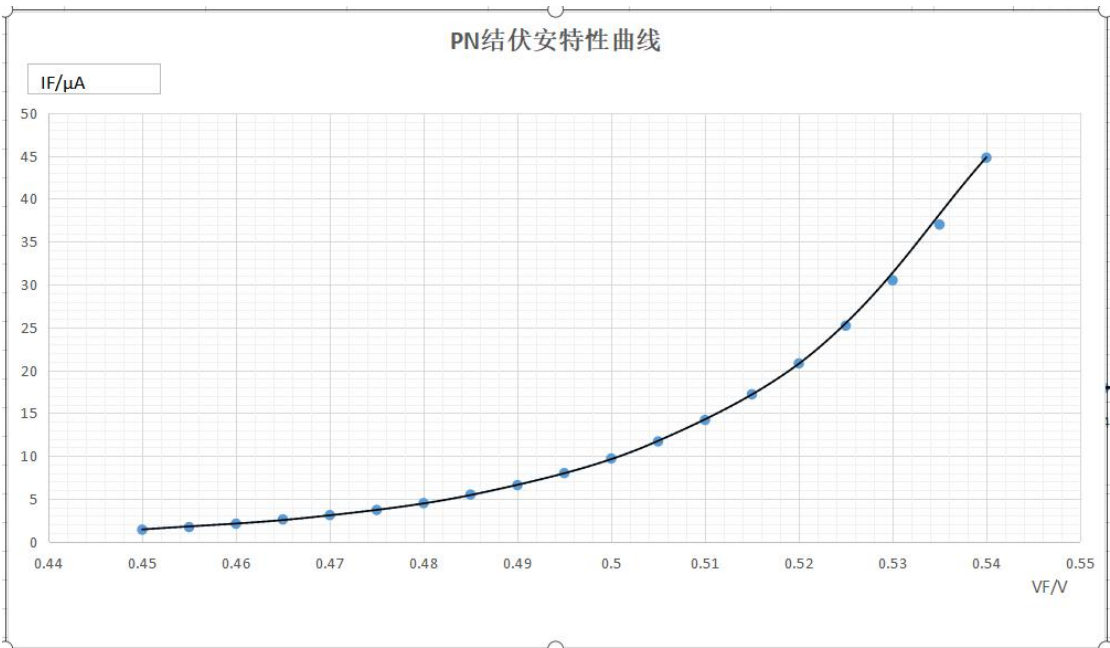
$V_F(V)$	0.450	0.455	0.460	0.465	0.470	0.475	0.480	0.485	0.490	0.495
$I_F(\mu A)$	1.4	1.7	2.1	2.6	3.1	3.7	4.5	5.5	6.6	8.0
$\ln I_F$	0.34	0.54	0.74	0.96	1.13	1.31	1.50	1.70	1.89	2.08
$V_F(V)$	0.500	0.505	0.510	0.515	0.520	0.525	0.530	0.535	0.540	
$I_F(\mu A)$	9.7	11.7	14.2	17.2	20.8	25.2	30.5	37.0	44.8	
$\ln I_F$	2.27	2.46	2.65	2.84	3.03	3.23	3.42	3.61	3.80	

表 2 PN 结温度特性曲线数据记录表

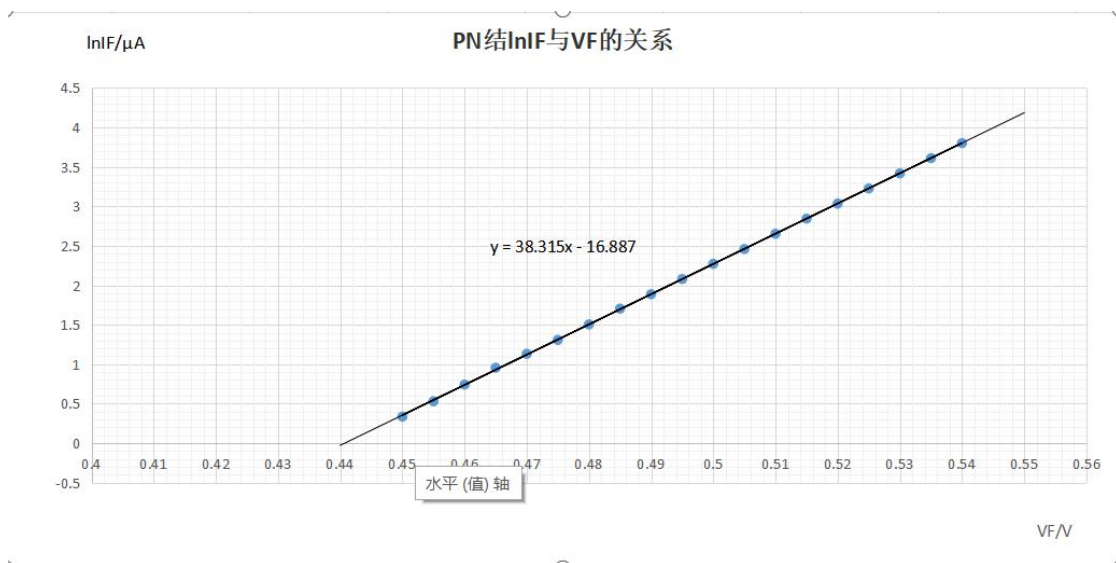
主要仪器：PN 结正向特性综合实验仪、Pt100 温度传感器、PN 结集成温度传感器  
精度：0.01V                      电流  $I_F = 50 \mu A$

温度值(℃)	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
T (K)	303.15	308.15	313.15	318.15	323.15	328.15	333.15	338.15	343.15	348.15	353.15
升温 $V_F(V)$	0.542	0.531	0.519	0.508	0.496	0.485	0.473	0.463	0.451	0.440	0.428
降温 $V_F(V)$	0.542	0.533	0.519	0.508	0.494	0.485	0.473	0.461	0.451	0.442	0.428
平均值	0.542	0.532	0.519	0.508	0.495	0.485	0.473	0.462	0.451	0.441	0.428

六、数据处理



作图人：乔翱  
作图时间：2020 年 6 月 22 日



作图人：乔翱  
作图时间：2020年6月22日

$$k_1 = \frac{y_{10} - y_1}{x_{10} - x_1} = \frac{2.08 - 0.34}{0.495 - 0.450} = 38.667$$

$$k_2 = \frac{y_{11} - y_2}{x_{11} - x_2} = \frac{2.27 - 0.54}{0.500 - 0.455} = 38.444$$

$$k_3 = \frac{y_{12} - y_3}{x_{12} - x_3} = \frac{2.46 - 0.74}{0.505 - 0.460} = 38.222$$

$$k_4 = \frac{y_{13} - y_4}{x_{13} - x_4} = \frac{2.65 - 0.96}{0.510 - 0.465} = 37.556$$

$$k_5 = \frac{y_{14} - y_5}{x_{14} - x_5} = \frac{2.84 - 1.13}{0.515 - 0.470} = 38.000$$

$$k_6 = \frac{y_{15} - y_6}{x_{15} - x_6} = \frac{3.03 - 1.31}{0.520 - 0.475} = 38.222$$

$$k_7 = \frac{y_{16} - y_7}{x_{16} - x_7} = \frac{3.23 - 1.50}{0.525 - 0.480} = 38.444$$

$$k_8 = \frac{y_{17} - y_8}{x_{17} - x_8} = \frac{3.42 - 1.70}{0.530 - 0.485} = 38.222$$

$$k_9 = \frac{y_{18} - y_9}{x_{18} - x_9} = \frac{3.61 - 1.89}{0.535 - 0.490} = 38.222$$

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9}{9}$$

$$= \frac{38.667 + 38.444 + 38.222 + 37.556 + 38.000 + 38.222 + 38.444 + 38.222 + 38.222}{9}$$

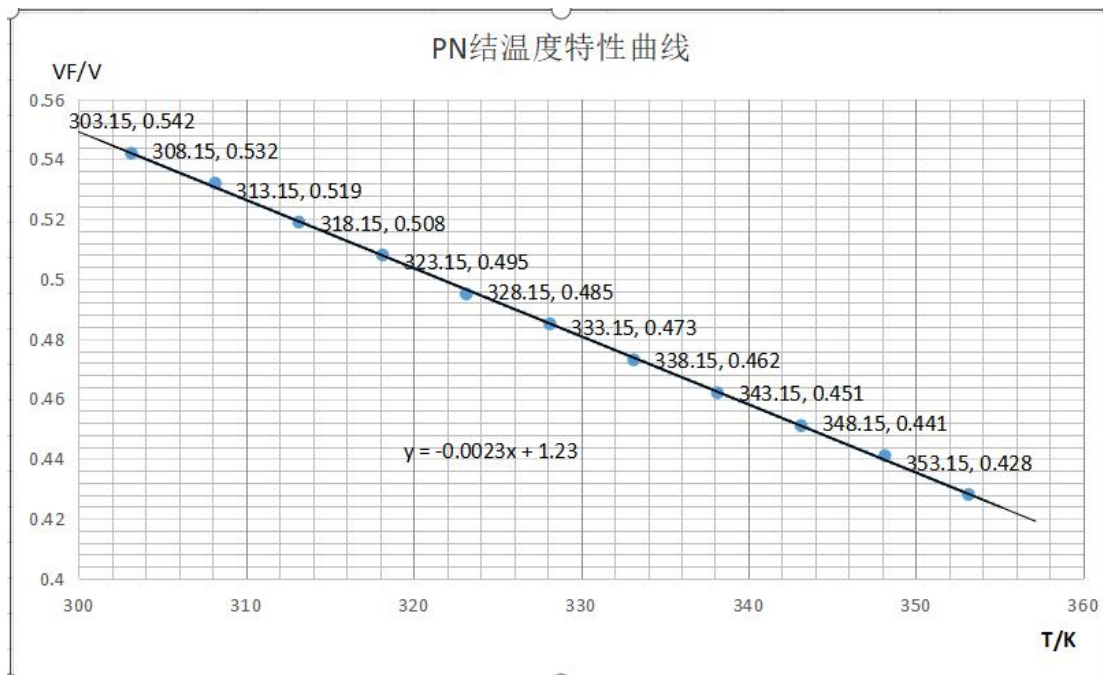
$$= 38.222$$

对公式  $I_F = I_S \exp(\frac{qV_F}{kT})$  取对数

$$\ln I_F = \frac{q}{kT} V_F + \ln I_S$$

$$\text{所以求得的玻尔兹曼常量 } k = \frac{q}{kT} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{38.222 \times 303.15} = 1.381 \times 10^{-23} (J / K)$$

$$\text{相对误差 } \sigma = \frac{|1.384 - 1.38|}{1.38} \times 100\% = 0.289\% \approx 0.29\%$$



作图人：乔翱  
作图时间：2020 年 6 月 22 日

由  $V_g(0) = V_F - ST$  得

$$V_F = ST + V_g(0)$$

根据所作图像可得曲线的斜率  $k = -0.0023$

所以灵敏度  $S = k = -0.0023 \text{ V/K} = -2.3 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$

由图可得被测PN结的禁带宽度  $E_g(0) = 1.23 \text{ eV}$

$$\text{相对误差为: } \sigma_E = \frac{|1.21 - 1.23|}{1.21} \times 100\% = 1.65\% \approx 1.7\%$$

## 七、误差分析

- 1、仪器精度所限会引起一定的误差。
- 2、绘制图像时会产生一定的误差。
- 3、外界环境因素可能会对实验有一定的影响，引起一定的误差。