

# 半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量实验

## 【实验目的】

1. 在室温时，测量 PN 结电流与电压关系，证明此关系符合指数分布规律。
2. 在不同温度条件下，测量玻尔兹曼常数。
3. 学习用运算放大器组成电流-电压变换器测量弱电流。
4. 测量 PN 结电压与温度的关系，求出该 PN 结温度传感器的灵敏度。
5. 计算在 0K 温度时，半导体硅材料的近似禁带宽度。

## 【实验原理】

1. PN 结伏安特性及玻尔兹曼常数测量

由半导体物理学可知，PN 结的正向电流-电压关系满足：

$$I = I_0 [\exp(eU/kT) - 1] \quad (1)$$

式中  $I$  是通过 PN 结的正向电流， $I_0$  是反向饱和电流， $T$  是热力学温度， $e$  是电子的电荷量， $U$  为 PN 结正向压降。由于在常温 (300K) 时， $kT/e \approx 0.026\text{V}$ ，而 PN 结正向压降约为十分之几伏，则  $\exp(eU/kT) \gg 1$ ，(1) 式括号内  $-1$  项完全可以忽略，于是有：

$$I = I_0 \exp(eU/kT) \quad (2)$$

也即当温度  $T$  恒定时，PN 结正向电流随正向电压按指数规律变化。若测得 PN 结  $I$ - $U$  关系值，则利用 (1) 式可以求出  $e/kT$ 。在测得温度  $T$  后，就可以得到  $e/k$  常数，把电子电量作为已知值代入，即可求得玻尔兹曼常数  $k$ 。

在实际测量中，二极管的正向  $I$ - $U$  关系虽然能较好满足指数关系，但求得的常数  $k$  往往偏小。这是因为通过二极管电流不只是扩散电流，还有其它电流。一般它包括三个部分：1) 扩散电流，它严格遵循 (2) 式；2) 耗尽层复合电流，它正比于  $\exp(eU/2kT)$ ；3) 表面电流，它是由硅和二氧化硅界面中杂质引起的，其值正比于  $\exp(eU/mkT)$ ，一般  $m > 2$ 。因此，为了验证 (2) 式及求出准确的  $e/k$  常数，不宜采用硅二极管，而采用硅三极管接成共基极线路，因为此时集电极与基极短接，集电极电流中仅仅是扩散电流。复合电流主要在基极出现，测量集电极电流时，将不包括它。本实验中选择性能良好的硅三极管 (TIP31 型)，实验中又处于较低的正向偏置，这样表面电流影响也完全可以忽略，所以此时集电极电流与结电压将满足 (2) 式。实验线路如图 2 所示。

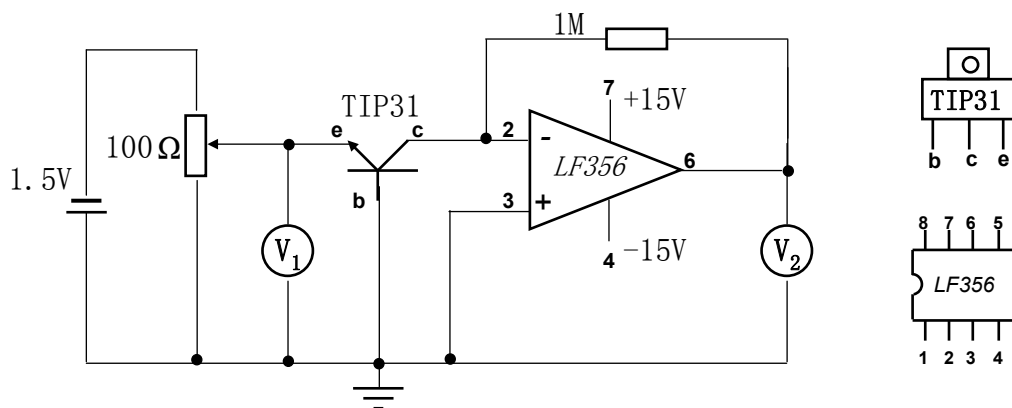


图 2 PN 结扩散电流与结电压关系测量线路图

## 2. 弱电流测量

过去实验中  $10^{-6} \text{ A} \sim 10^{-11} \text{ A}$  量级弱电流采用光点反射式检流计测量，该仪器灵敏度较高约  $10^{-9} \text{ A/分度}$ ，但有许多不足之处，如十分怕震，挂丝易断；使用时稍有不慎，光标易偏出满度，瞬间过载引起引丝疲劳变形产生不回零点及指示差变大。使用和维修极不方便。近年来，集成电路与数字化显示技术越来越普及。高输入阻抗运算放大器性能优良，价格低廉，用它组成电流-电压变换器测量弱电流信号，具有输入阻抗低，电流灵敏度高。温漂小、线性好、设计制作简单、结构牢靠等优点，因而被广泛应用于物理测量中。

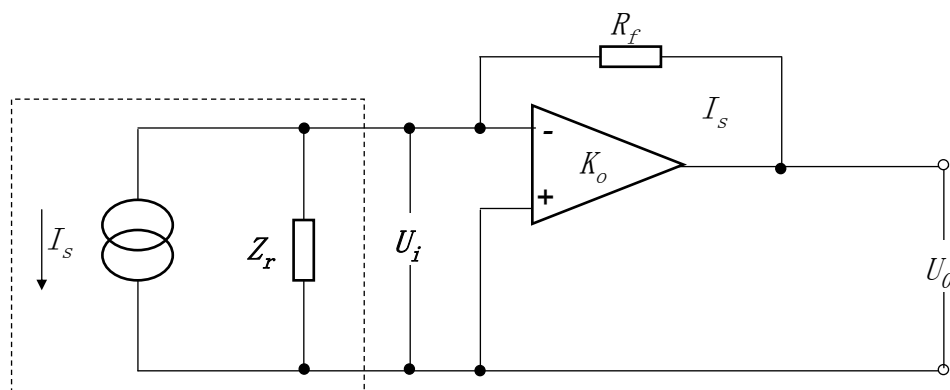


图 3 电流-电压变换器

LF356 是一个高输入阻抗集成运算放大器，用它组成电流-电压变换器(弱电流放大器)，如图 3 所示。其中虚线框内电阻  $Z_r$  为电流-电压变换器等效输入阻抗。由图 2，运算放大器的输出电压  $U_0$  为：

$$U_0 = -K_0 U_i \quad (3)$$

式(3)中  $U_i$  为输入电压,  $K_0$  为运算放大器的开环电压增益, 即图 3 中电阻  $R_f \rightarrow \infty$  时的电压增益,  $R_f$  称反馈电阻。因为理想运算放大器的输入阻抗  $r_i \rightarrow \infty$ , 所以信号源输入电流只流经反馈网络构成的通路。因而有:

$$I_s = (U_i - U_0) / R_f = U_i (1 + K_0) / R_f \quad (4)$$

由(4)式可得电流-电压变换器等效输入阻抗  $Z_r$  为

$$Z_r = U_i / I_s = R_f / (1 + K_0) \approx R_f / K_0 \quad (5)$$

由(3)式和(4)式可得电流-电压变换器输入电流  $I_s$  输出电压  $U_0$  之间得关系式, 即:

$$I_s = -\frac{U_0}{K} (1 + K_0) / R_f = -U_0 (1 + 1/K_0) / R_f = -U_0 / R_f \quad (6)$$

由(6)式只要测得输出电压  $U_0$  和已知  $R_f$  值, 即可求得  $I_s$  值。以高输入阻抗集成运算放大器 LF356 为例来讨论  $Z_r$  和  $I_s$  值的大小。对 LF356 运放的开环增益  $K_0 = 2 \times 10^5$ , 输入阻抗  $r_i = 10^{12} \Omega$ 。若取  $R_f$  为  $1.00 M\Omega$ , 则由(5)式可得:

$$Z_r = 1.00 \times 10^6 \Omega / (1 + 2 \times 10^5) = 5 \Omega \quad (7)$$

若选用数字电压表的分辨率为  $0.01V$ , 那么用上述电流-电压变换器能显示最小电流值为:

$$(I_s)_{\min} = 0.01V / (1 \times 10^6) = 1 \times 10^{-8} A \quad (8)$$

由此说明, 用集成运算放大器组成电流-电压变换器测量弱电流, 具有输入阻抗小、灵敏度高的优点。

### 3. PN 结的结电压 $U_{be}$ 与热力学温度 T 关系测量。

当 PN 结通过恒定小电流 (通常电流  $I = 1mA$ ), 由半导体理论可得  $U_{be}$  与 T 近似关系:

$$U_{be} = ST + U_{go} \quad (9)$$

式中 S 为 PN 结温度传感器灵敏度。由  $U_{go}$  可求出温度 0K 时半导体材料的近似禁带宽度  $E_{go} = qU_{go}$ 。

硅材料的  $E_{go}$  约为  $1.20eV$ 。

### 【实验仪器】

1. 直流电源、液晶测量显示模块、恒温组合装置（包括 1.5V 及 3mA 可调直流电源、干井式铜质可调节恒温器、温控仪）。
2. TIP31 型三极管（带三根引线）1 个, 9013 三极管 1 个（带二根引线）。
3. 干井铜质恒温器（含加热器）及小电风扇各 1 个。
4. 配件：LF356 运算放大器 2 块，TIP31 型三极管 1 只, 9013 三极管 1 只，连接线 5 根。

### 【实验过程】

1.  $I_c - U_{be}$  关系测定，并进行曲线拟合求经验公式，计算玻尔兹曼常数。（ $U_{be} = U_1$ ）

1) 实验线路如图 2 所示。图中  $U_1$  和  $U_2$  为液晶屏数显电压，TIP31 型为带散热板的功率三极管，调节电压的分压器为多圈电位器，为保持 PN 结与周围环境一致，把 TIP31 型三极管浸没在干井槽中，温度用 DS18B20 数字温度传感器进行测量。

2) 在室温情况下，测量三极管发射极与基极之间电压  $U_1$  和相应电压  $U_2$ 。在常温下  $U_1$  的值约从 0.3V 至 0.42V 范围每隔 0.01V 测一点数据，约测 10 多数据点，至  $U_2$  值达到饱和时（ $U_2$  值变化较小或基本不变），结束测量。在记数据开始和记数据结束都要同时记录干井恒温器的温度  $\theta$ ，取温度平均值  $\bar{\theta}$ 。

3) 改变干井恒温器温度，待 PN 结与恒温器温度一致时，重复测量  $U_1$  和  $U_2$  的关系数据，并与室温测得的结果进行比较。

4) 曲线拟合求经验公式：以  $U_1$  为自变量， $U_2$  作因变量，运用最小二乘法，将实验数据代入指数函数  $U_2 = a \exp(bU_1)$ ，求出函数相应的  $a$  和  $b$  值。

5) 计算  $e/k$  常数，将电子的电量作为标准差代入，求出玻尔兹曼常数并与公认值进行比较。

2.  $U_{be} - T$  关系测定，求 PN 结温度传感器灵敏度 S，计算硅材料 0K 时近似禁带宽度  $E_{go}$  值。

1) 实验线路如图 4 所示。其中  $V_2$  用于对电阻 R 两端的电压进行采样，调节恒流源使其示数为 1.000V，则即电流为  $I = 1mA$  用。

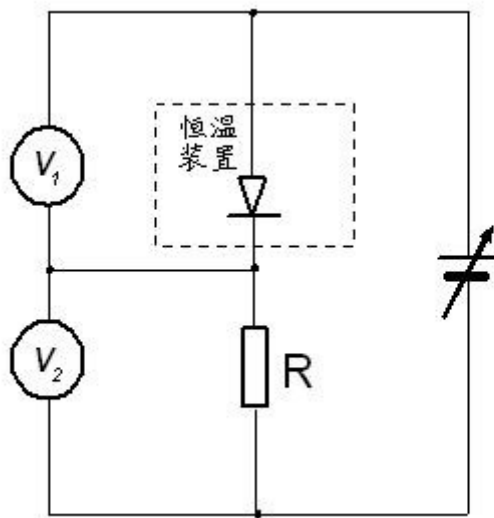


图 4 PN 结温度传感器  $U_{be} - T$  关系测量实验电路

2) 从室温开始每隔  $5^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$  测一点  $U_{be}$  值 (即  $V_1$ ) 与温度  $t(^{\circ}\text{C})$  关系, 求得  $U_{be} - T$  关系。(至少测 6 点以上数据)

3) 用最小二乘法对  $U_{be} - T$  关系进行直线拟合, 求出 PN 结测温灵敏度  $S$  及近似求得温度为  $0\text{K}$  时硅材料禁带宽度  $E_{go}$ 。

**【实验数据】**(注: 以下数据不作为仪器验收标准, 仅供实验时参考)

1.  $I_c - U_{be}$  关系测定, 曲线拟合求经验公式, 计算玻尔兹曼常数。

室温条件下:  $\theta_1 = 29.70^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_2 = 29.30^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{\theta} = 29.50^{\circ}\text{C}$

表 1 PN 结扩散电流-电压关系测量数据表

$U_1/\text{V}$	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280	0.290	0.300	0.310	0.320	0.330
$U_2/\text{V}$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.09	0.13	0.19	0.29
$U_1/\text{V}$	0.340	0.350	0.360	0.370	0.380	0.390	0.400	0.410	0.420	0.425	
$U_2/\text{V}$	0.42	0.61	0.91	1.31	1.91	2.81	4.13	6.05	8.76	10.80	

以  $U_1$  为自变量,  $U_2$  为因变量, 进行指数函数  $U_2 = a \exp(bU_1)$  的拟合, 拟合所得曲线见图 5。

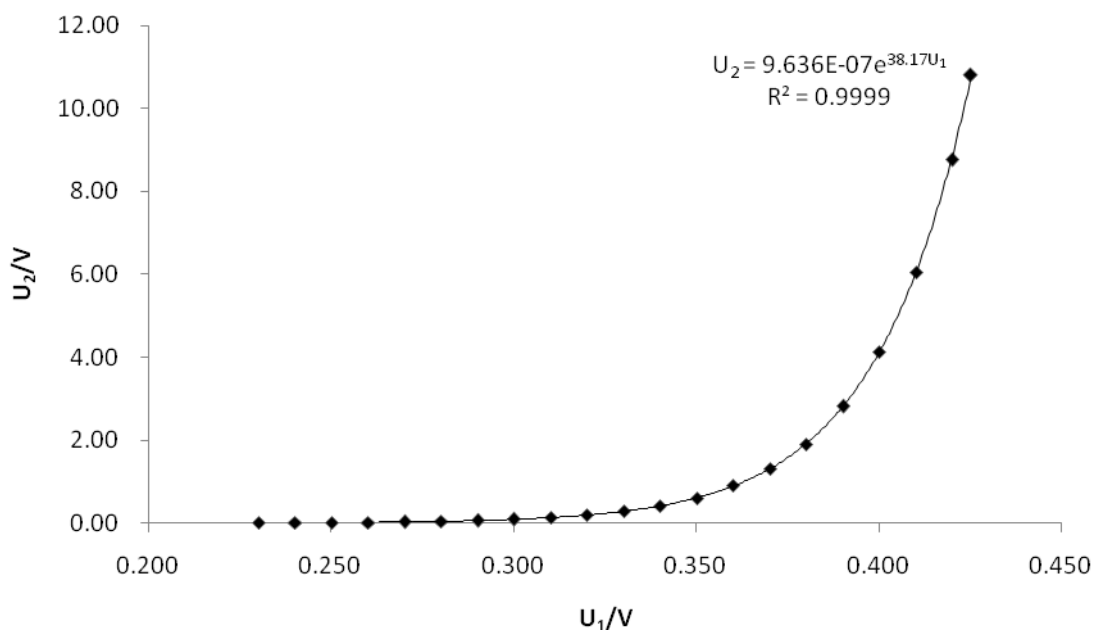


图 5 PN 结扩散电流-电压关系曲线

以下计算玻尔兹曼常数:

由表 1 数据得

$$e/k = bT = 38.17 \times (273.15 + 29.50) = 1.155 \times 10^4 \text{ CK/J}$$

则

$$k = \frac{e}{e/k} = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{1.155 \times 10^4} = 1.387 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

此结果与公认值  $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  相当一致。

2. 电流  $I = 1 \text{ mA}$  时,  $U_{be} - T$  关系测定, 求 PN 结温度传感器的灵敏度  $S$ , 计算 0K 时硅材料的近似

禁带宽度  $E_{go}$ 。

表 2  $U_{be} - T$  关系测定数据表

t/°C	29.8	35	40	45	50	55	60	65	70	75	79.9
T/K	302.95	308.15	313.15	318.15	323.15	328.15	333.15	338.15	343.15	348.15	353.05
U <sub>be</sub> /V	0.613	0.602	0.592	0.581	0.571	0.56	0.55	0.539	0.529	0.518	0.507

对  $U_{be} - T$  数据进行直线拟合得到曲线如图 6。

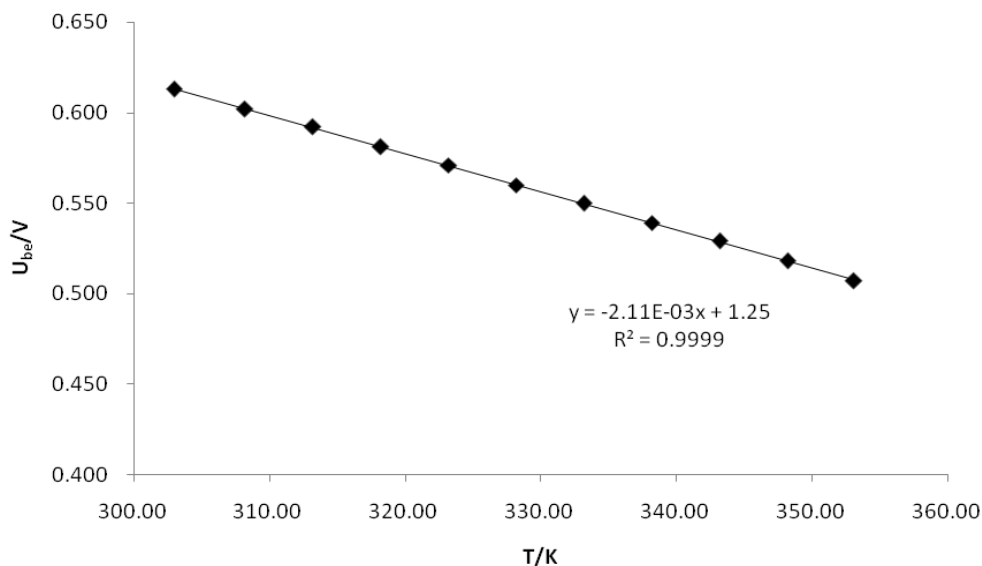


图 6 PN 结温度传感器  $U_{be} - T$  关系曲线

其斜率，即传感器灵敏度  $S = -2.11mV/K$

其截距  $U_{go} = 1.25K$  (0K 温度)

$$E_{go} = eU = 1.25eV$$

硅在 0K 温度时禁带宽度公认值  $E_{go} = 1.205eV$ ，上述结果半定量地反映了此结果。由于 PN 结温度传感器的线性范围为  $-50^{\circ}C - 150^{\circ}C$ ，在低温时，非线性项将不可完全忽略，所以本实验测得  $U_{go} = 1.25K$  是合理的。

#### 【参考资料】

1. 沈元华 陆申龙 主编. 基础物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社 2003. 12: 193-196
2. 吕斯骅 段家祗 主编. 基础物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社 2003. 3: 307
3. 徐华伟 谭春光 朱亚辉 陆申龙. 低温半导体 PN 结的物理特性及玻尔兹曼常数的测量, 大学物理实验[J], 1999, 12 (2): 1-3
4. 陆申龙 曹正东. 低温条件下半导体材料禁带宽度的测量, 大学物理[J], 第 15 卷第 10 期 1996, 10: 37-39