

## 实验一 PN 结物理特性的测量

伏安特性是 PN 结的基本特性，测量 PN 结的扩散电流与 PN 结电压之间的关系，可以验证它们遵守波尔兹曼分布，并进而求出波尔兹曼常数的值。PN 结的扩散电流很小，为  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  A 数量级，所以在测量 PN 结扩散电流的过程中，运用了弱电流测量技术，即用运算放大器对电流进行电流-电压变换。

### 【实验目的】

1. 学习利用运算放大器测量微小电流；
2. 掌握 PN 结的伏安特性，学习曲线拟合方法，求出波尔兹曼常数。

### 【实验原理】

#### 1. LF356 运算放大器介绍

利用 LF356 运算放大器可以组成电流-电压变换器，如图 1 所示。LF356 运算放大器是一个集成运算放大器， $R_f$  为反馈电阻，若  $R_f \rightarrow \infty$  时，输出电压  $U_0$  与输入电压  $U_i$  的比值叫做运算放大器的开环增益  $K_0$ 。运算放大器的输入阻抗  $r$  很大，理想情况下  $r \rightarrow \infty$ ，可以认为反馈电流等于信号源的输入电流  $I_s$ 。 $Z_f$  为电流-电压变换器的等效输入阻抗，因为反馈电流等于信号源的输入电流  $I_s$ ，输入电流  $I_s$  可以写为

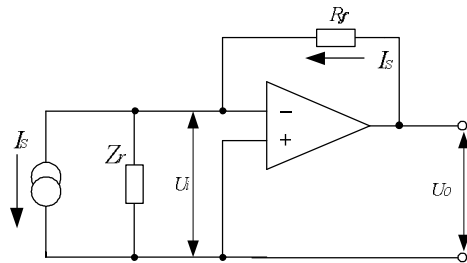


图 1 电流-电压变换电路

$$I_s = \frac{U_i - U_0}{R_f} \quad (1)$$

其中， $U_i$  为运算放大器的输入电压， $U_0$  为运算放大器的输出电压，二者的关系为：

$$U_0 = -K_0 U_i \quad (2)$$

将 (2) 代入 (1) 得：

$$I_s = \frac{U_i - U_0}{R_f} = -\frac{U_0}{R_f} \left(1 + \frac{1}{K_0}\right) \approx -\frac{U_0}{R_f} \quad (3)$$

其中  $K_0$  运算放大器的开环电压放大倍数，一般为  $10^5 \sim 10^6$ 。

所以，如果测出  $U_0$ ，即可得到  $I_s$ 。我们选取反馈电阻  $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ ，用量程为 200 mV 的数字电压表，它的分辨率为 0.01 mV，则能测到的最小电流为

$$I_s = \frac{0.01 \text{ mV}}{1 \text{ M}\Omega} = 1 \times 10^{-11} \text{ A}$$

由此可见，电流-电压变换器具有很高的灵敏度。

## 2. PN 结的伏安特性

从固体理论可知，理想 PN 结的正向电流-电压关系满足下式

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

其中， $I$  是通过 PN 结的正向电流， $I_0$  是反向饱和电流（与半导体的性质和掺杂有关）， $U$  是加在 PN 结上的正向电压， $T$  为绝对温度， $k_B$  为波尔兹曼常数， $e$  为基本电荷量。常温下， $e/k_B T \approx 38$ ， $\exp(eU/k_B T) \gg 1$ ，(1) 式可以近似写成

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) \quad (5)$$

在常温下，PN 结的正向电流随正向电压按  $e$  指数规律变化，电压很小时，电流很小，需要用电流-电压变换器测量电流。如果测量得到 PN 结的伏安特性，即可验证上述规律。测量得到温度  $T$  后，利用基本电荷值，可求得波尔兹曼常数  $k_B$ 。将 (2) 式两边取对数，得

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{eU}{k_B T} \quad (6)$$

分别以  $U$  和  $\ln I$  为变量，作线性最小二乘法拟合，得到  $e/k_B T$ ，可以得到  $k_B$ 。实验中（见图 3）， $U$  为  $U_1$ ， $I = U_2/R_f$ ，(6) 式变为

$$\ln U_2 = (\ln I_0 + \ln R_f) + \frac{eU_1}{k_B T} \quad (7)$$

用  $U_1$  为横坐标， $\ln U_2$  为纵坐标拟合即可。

在实验中，如果利用二极管进行测量，往往得不到好的结果，其原因是：(a) 存在耗尽层电流，其值正比于  $\exp(eU/2k_B T)$ ；(b) 存在表面电流，其值正比于  $\exp(eU/mk_B T)$ ， $m > 2$ 。

为了不受上述影响，一般不用二极管，而是采用三极管接成共基极电路，集电极与基极短接。复合电流主要在基极出现，集电极中主要是扩散电流，如果选择好的三极管，表面电流也可以忽略，此时集电极电流与基极、发射极电压满足 (2) 式。本实验选择 TIP31 型硅三极管。

## 【实验仪器】

±15V 直流稳压电源，TIP31 型硅三极管，LF356 集成运算放大器，四位半数字万用表，电阻，电容，电位器，导线，实验接线板等。

TIP31 型硅三极管，LF356 集成运算放大器的管脚如图 2 所示。

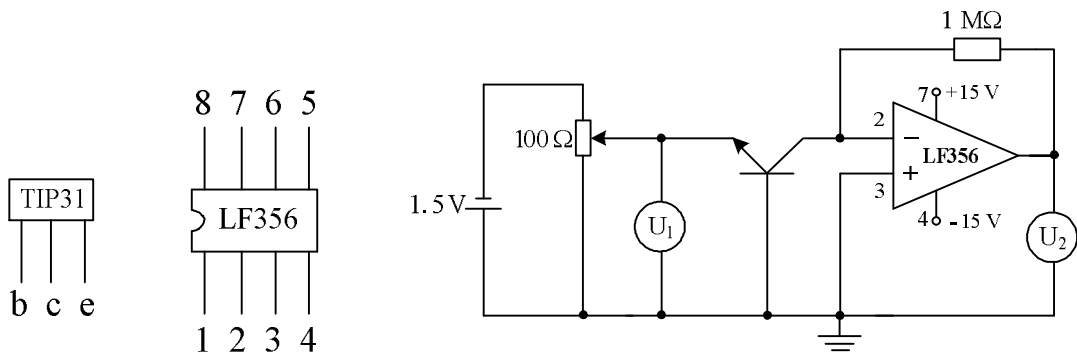


图2 元件管脚图

图3 实验线路图

### 【实验内容】

实验线路图如图3所示。在常温和零温（冰水混合物）下测量硅三极管发射极与基极之间的电压  $U_1$  和相应的 LF356 输出电压  $U_2$ 。通过调节  $100\Omega$  可调电位器改变  $U_1$  的值，尽量在线性区域多测量数据点。根据公式（7）拟合求波尔兹曼常数  $k_B$ 。

### 【思考题】

1. 得到的数据一部分在线性区，一部分不在线性区，为什么？拟合时应如何注意取舍？
2. 减小反馈电阻的代价是什么？对实验结果有影响吗？

### 【参考资料】

- [1] 陆申龙等. 半导体 PN 结  $I-V$  关系曲线拟合以及  $e/k_B$  的测定. 物理实验 (1), 1992
- [2] A. Sconza, G. Torzo, and G. Viola “Experiment on the physics of the PN junction”, Am. J. Phys. 62 (1), 1994