

半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量实验

半导体 PN 结具有广泛的应用，如各种晶体管、太阳能电池、半导体激光器、发光二极管、半导体制冷器等均由半导体 PN 组成。半导体 PN 结的物理特性是物理学和电子学的重要基础内容之一。PN 结扩散电流与正向电压遵循指数分布关系规律，本实验通过测量该关系曲线，能够较为精确地测出玻尔兹曼常数(物理学重要常数之一)。另外，本实验通过测量 PN 结结电压 U_{be} 与热力学温度 T 的关系，可求得 PN 结温度传感器的灵敏度，并近似求得 0K 时硅材料的禁带宽度。

一、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。

二、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。

三、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。本实验中选取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。

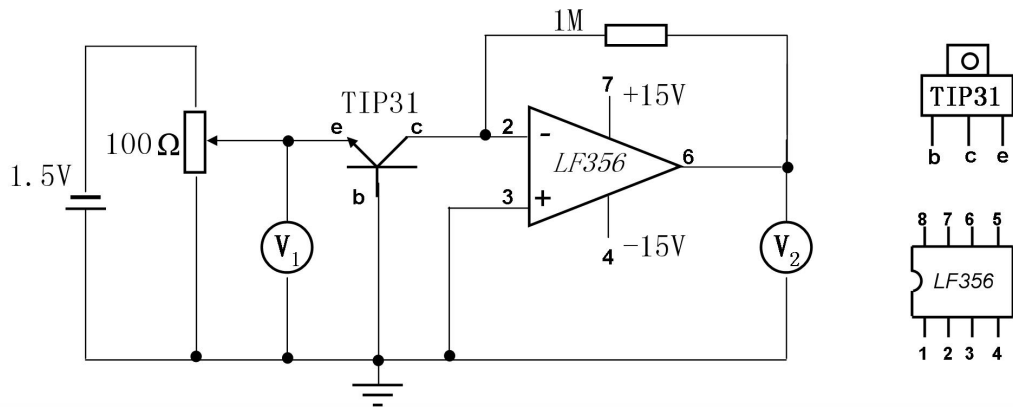


图 1 PN 结扩散电流与结电压关系测量线路图

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} 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。

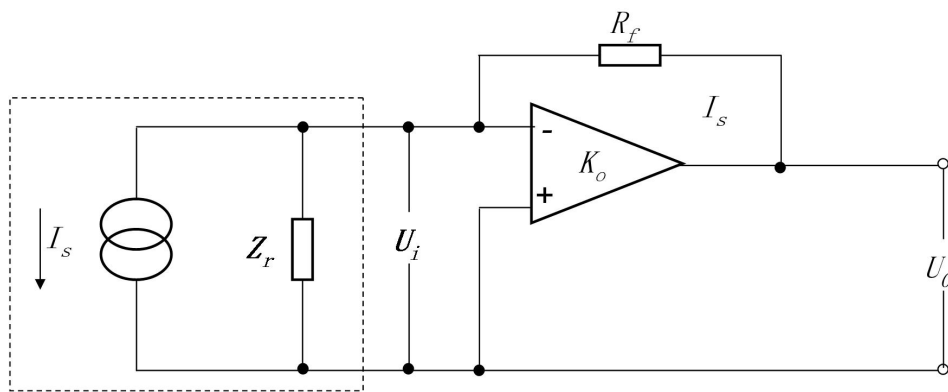


图 2 电流-电压变换器

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_o 为：

$$U_o = -K_o U_i \quad (3)$$

式(3)中 U_i 为输入电压， K_o 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：

$$I_s = (U_i - U_o) / R_f = U_i (1 + K_o) / R_f \quad (4)$$

由(4)式可得电流-电压变换器等效输入阻抗 Z_r 为

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

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_o 之间得关系式，即：

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

由(6)式只要测得输出电压 U_o 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 $K_o = 2 \times 10^5$ ，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。

四、实验内容与步骤

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 1 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 θ ，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 3 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。

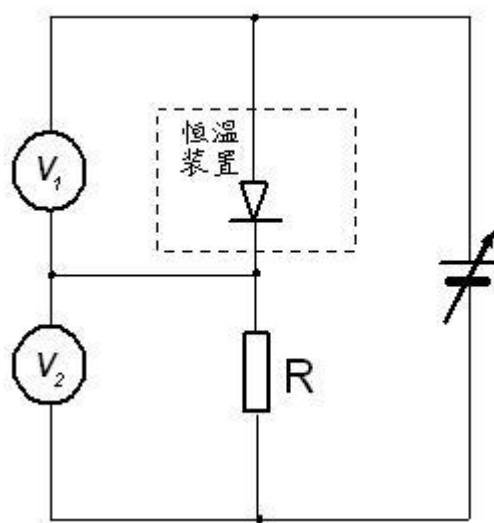


图 3 PN 结温度传感器 $U_{be} - T$ 关系测量实验电路

- 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 0K 时硅材料禁带宽度 E_{go} 。

五、数据记录与处理

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。

表 1 PN 结扩散电流-电压关系测量数据表

U_1/V	
U_2/V	
U_1/V	
U_2/V	

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。计算玻尔兹曼常数, 并与公认值 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 比较, 计算标准偏差。

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	30	35	40	45	50	55	60	65	70
T/K									
U_{be}/V									

对 $U_{be} - T$ 数据进行直线拟合。求直线的斜率，即传感器灵敏度。由直线的截距计算硅在 0K 温度时禁带宽度，并与公认值 $E_{go} = 1.205eV$ 比较，计算标准偏差。

六、注意事项

1. 应仔细观察 PN 结正负极，严禁将正负极反接入电路；
2. 扩散电流太小及扩散电流接近或者达到饱和时，这些数据偏离理论计算公式，进行数据处理时应删除；
3. 测量扩散电流与正向电压关系时，应保证三极管器件处于恒温状态；
4. 要换运算放大器必须在切断电源条件下进行，并注意管脚不要插错；
5. 必须经教师检查线路接线正确，学生才能开启电源，实验结束应先关电源，才能拆除接线。

七、预习思考题

- 1、二极管的正向 I-U 满足指数关系，而在实际测量中，为什么测得的玻尔兹曼常数 k 往往偏小？本实验是如何减小测量误差的？
- 2、本实验中为什么要使用集成运算放大器？试概述其工作原理。

八、分析思考题

如果在测量时 PN 的温度偏离室温，高于或者低于室温，将会对玻尔兹曼常数的测量值带来什么影响？