

测量非线性元件的伏安特性

张欣睿^{*}

北京大学化学与分子工程学院 学号：1600011783

摘 要：本次实验讲解了电学实验的基本知识，并运用电学和电学实验的基础知识组装了伏安法测量电阻和稳压二极管的电路，测量了两个电阻的阻值和稳压二极管的伏安特性，在经过数据处理后得出了它们的伏安特性曲线。通过适当的修正手段，获得了较为准确的电阻测定值，并通过稳压二极管的伏安曲线探究了稳压管的一些性能。

关键词：电学实验；伏安法；稳压二极管；非线性元件

^{*} e-mail: zhangxinrui16@pku.edu.cn; mobile number: 18801391162

1 引言

伏安法是一种常用的测定电学器件伏安特性的方法。给一个电学元件通直流电，通过调整负载两端的电压值，测量通过负载的电流，做出电流随电压变化的曲线（伏安特性曲线），可以直观的观察出元件的伏安特性，并从图线求出元件在某一状态下的静态电阻、动态电阻、电导等物理量。这种测量元件的伏安特性的方法即为伏安法。

实验中使用的稳压二极管是一种特殊的半导体硅二极管，它的特性是在反向击穿电压区的一个很宽的电流区间内保证伏安曲线几乎竖直（电压不变），并且其击穿是可逆的。因为稳压二极管的这些特性，它在稳压和恒流电路中发挥着重要的作用。

本实验中运用到了伏安法测定稳压二极管的伏安特性。在测定这一特性之前，也运用伏安法测定了两个电阻的伏安特性作为练习。本次实验使我较好的掌握了使用伏安法进行电学量的测量的基本实验技能。

2 实验数据处理

实验开始时，先使用数字电表对电阻进行了粗测。短接数字电表的两支表笔，测得其内阻为 $0.72\ \Omega$ ，再用 $200\ \Omega$ 档测量小电阻 R_{x1} 、用 $2\ \text{k}\Omega$ 档测量大电阻 R_{x2} ，其结果如表 1 所示。

| 电阻 | R_{x1} | R_{x2} |
|---------|-----------------|--------------------------|
| 数字电表读数值 | $48.34\ \Omega$ | $1.0049\ \text{k}\Omega$ |
| 粗测电阻阻值 | $47.62\ \Omega$ | $1.0049\ \text{k}\Omega$ |

表 1 用数字电表（ $200\ \Omega$ 档内阻约 $0.72\ \Omega$ ）粗测电阻阻值

进行粗测之后，使用指针电流表的 $75\ \text{mA}$ 量程（内阻为 $2.18\ \Omega$ ）和指针式电压表（内阻为 $200\ \Omega \cdot \text{V}^{-1}$ ）的 $3\ \text{V}$ 量程，利用电流表外接法测量小电阻 R_{x1} ，电压平均间隔取点采集了 9 组数据，如表 2 所示。

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 电压 / V | 0.300 | 0.600 | 0.900 | 1.200 | 1.500 | 1.800 | 2.100 | 2.400 | 2.700 |
| 电流 / mA | 6.9 | 13.9 | 20.6 | 27.2 | 34.1 | 41.1 | 47.9 | 54.6 | 61.5 |

表 2 用电流表外接法测量电阻 R_{x1} 数据

根据数据可以作图，得到的伏安曲线为一条直线，如后附图 1 所绘制的。根据伏安曲线的斜率 k 可以求出电阻值 R_{x1} ，其值为：

$$R_{x1} = \frac{1}{k}$$

根据线性回归方法，求得图线的斜率 $k = 2.27 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$ ，故其阻值 $R_{x1} = 44.0 \Omega$ 。再将所给数据根据讲义上的式（3.2）进行修正：

$$\frac{1}{R_x} = \frac{I}{U} - \frac{1}{R_V}$$

$$\text{即 } R_{x1} = \frac{UR_V}{IR_V - U} = \frac{R_{x\text{测}}R_V}{R_V - R_{x\text{测}}}, \text{ 并取 } R_V = 600 \Omega, \text{ 得到 } R_{x1} = 47.5 \Omega, \text{ 和粗测值}$$

很接近，说明测量比较成功。

类似地，使用电流表内接法测量电阻 R_{x2} ，所用电压表量程为 7.5 V ($200 \Omega \cdot V^{-1}$)，取电流表量程为 15 mA（内阻为 9.10Ω ），数据如表 3 所示。值得注意的是，在测定过程中，电压的前 3 组数据对应电流较小，在测量时同时测量了更换小量程（3 mA，内阻为 22.6Ω ）进行测量的电流值，如表 4 所示。

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 电压 / V | 1.000 | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 4.500 | 5.000 | 5.500 | 6.000 |
| 电流 / mA | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 3.98 | 4.46 | 4.94 | 5.42 | 5.96 |

表 3 用电流表内接法测量电阻 R_{x2} 数据（电流表量程均为 15 mA）

| 序号 | 1' | 2' | 3' | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 电压 / V | 1.000 | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 4.500 | 5.000 | 5.500 | 6.000 |
| 电流 / mA | 0.788 | 1.878 | 2.928 | 3.98 | 4.46 | 4.94 | 5.42 | 5.96 |

表 4 用电流表内接法测量电阻 R_{x2} 数据（前三组电流表量程为 3 mA）

根据表中数据做出伏安曲线的图象，在作图时将不同量程部分画成两支图线，如后附图 2 所示。为不引入其它系统误差，取不改变量程的表 3 数据做回归分析，求得图线斜率 $k = 9.86 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ ，故 R_{x2} 内阻约为 $1.014 \text{ k}\Omega$ 。类似地，按照讲义（3.1）式进行修正：

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A = R_{x\text{测}} - R_A$$

取 R_A 为相应量程电流表的内阻 9.10Ω ，则取 $R_x = 1.005 \text{ k}\Omega$ 为 R_{x2} 的精确阻值，吻合粗测数据。

在测定电阻之后，使用电流表外接法对稳压二极管的伏安特性进行了测定。测量得到稳压管的导通电压为 0.7230 V ，伏安特性测量所得数据如表 5 所示。其中，电流超过 $200 \mu\text{A}$ 的，改用数字表的 2 mA 档；超过 2 mA 的，改用数字表的 20 mA 档，反向测定亦如是。

| | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 正向电压 / V | 0.4423 | 0.5048 | 0.5258 | 0.5423 | 0.5563 | 0.5704 | 0.5814 |
| 正向电流 / μA | 1.56 | 5.16 | 7.81 | 10.90 | 14.52 | 19.42 | 24.54 |
| 正向电压 / V | 0.5981 | 0.6080 | 0.6221 | 0.6369 | 0.6568 | | |
| 正向电流 / μA | 35.15 | 43.71 | 60.15 | 84.76 | 137.17 | | |
| 正向电压 / V | 0.6994 | 0.7165 | 0.7277 | 0.7445 | 0.7527 | 0.8000 | 0.8193 |
| 正向电流 / mA | 0.4148 | 0.6692 | 0.9233 | 1.5126 | 1.9367 | 8.224 | 14.912 |
| 反向电压 / V | -3.004 | -4.002 | -4.556 | -4.868 | -4.969 | -5.276 | |
| 反向电流 / μA | -0.69 | -1.89 | -4.72 | -9.55 | -12.45 | -35.97 | |
| 反向电压 / V | -5.411 | -5.440 | -5.476 | -5.478 | -5.491 | -5.511 | -5.532 |
| 反向电流 / mA | -0.087 | -0.124 | -0.701 | -0.911 | -4.001 | -10.002 | -17.104 |

表 5 稳压二极管的伏安特性测量数据

通过表中数据可以作稳压二极管的伏安曲线，如后附图 3 所示。从图中可以计算几个特征点的静态、动态电阻值。其中：

正向电压为 0.8 V 的点：静态电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0.8000}{8.224 \times 10^{-3}} \Omega = 97.28 \Omega$$

反向电压为 -4 V 的点：静态电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{-4.002}{-1.89 \times 10^{-6}} \Omega = 2.12 \times 10^6 \Omega$$

反向电流为 -10 mA 的点：动态电阻（用差分近似代替微分结果）

$$R' = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{-5.511 - (-5.532)}{-10.002 - (-17.104)} \Omega = 2.957 \times 10^{-3} \Omega \quad \text{单位不对，gg}$$

3 实验思考题

(1) 使用多用表（20 k Ω 以上各档）测量二极管的正向电阻，为什么各档测得数值不同？如果测量一个线性电阻，情况会怎样？

答：数字多用表的不同欧姆档是由内置电源和不同阻值的电阻所组成的。在使用不同档位时，多用表接入电路部分的内阻改变了，因而输出到二极管的电压也改变了。二极管是非线性元件，在不同的电压下自然会体现不同的静态电阻，因而各档测定的数值不同。如果测量一个线性电阻，由于内阻不同，测量结果可能有微小的差别，但是不会有较大的偏差。

(2) 测量正向伏安曲线时你采用了哪种电表接法，为什么？

答：采用电流表外接法。如果使用电流表内接法，电流表能测定通过稳压管电流的准确值，但电压表不能测得稳压管两端的准确电压。且由于稳压管正向电阻较小，电流表能分到较为可观的压降，使电压测定值的相对误差较大。而如果采用电流表外接法，电压表可以测得两端电压的准确电压，而电流表不能测得准

确电流；但电压表电阻相比稳压管正向电阻来说很大，分到的电流比例较小，电流测定值的相对误差较小，因而可以忽略这部分误差，近似进行测定。

4 分析与讨论

在测定电阻的结果部分中，按照伏安法修正公式对测量所得的电阻进行了修正。对于小电阻 R_{x1} ，测量结果从 $44.0\ \Omega$ 修正到了 $47.5\ \Omega$ ，与粗测电阻 $47.62\ \Omega$ 更加接近，可以判断这一修正效果是比较好的，测量结果有所改善。对于大电阻 R_{x2} ，测量结果从 $1.014\ \text{k}\Omega$ 修正到了 $1.005\ \text{k}\Omega$ ，与粗测电阻 $1.0049\ \text{k}\Omega$ 也更加吻合，从实验证明了伏安法修正公式的合理性。

另外从这一修正过程可以对比电流表内接法和外接法的区别。电流表内接法适合测量大电阻，所测的结果也偏大；电流表外接法适合测量小电阻，同时所测定的结果也偏小。

实验测得了所用的稳压二极管在一些特征值下的静态、动态电阻，它们也分别代表了稳压二极管在一定条件下的性能。

在正向电压为 $0.8\ \text{V}$ （已经超过导通电压）时，二极管导通，静态电阻为 $97.28\ \Omega$ ，这部分静态电阻代表了二极管导通之后的电阻，不超过 $10^2\ \Omega$ 的阻值较小，证明了其导通性能较好。

在反向电压为 $-4\ \text{V}$ 时，求得的静态电阻为 $2.12 \times 10^6\ \Omega$ ，阻值很大，此时反向没有击穿，证明了稳压管在未导通时阻抗性能很优秀，几乎不让电流通过。

而在反向电流为 $-10\ \text{mA}$ ，动态电阻为 $2.957 \times 10^{-3}\ \Omega$ ，阻值很小，反映了在反向击穿状态下，电流有很大改变时对应的电压也几乎不变，伏安曲线几乎竖直，稳压二极管在不同电流下稳压性能很优秀。

5 收获与感想

本次实验中我学习到了电学实验的基本知识，并运用这些知识实际测定了电阻和稳压二极管的伏安特性。在连接电路时，我理解了断开开关连电路、最后连接电源等操作的安全性和意义。在测定元器件的伏安特性时，从理论走到了实际，完成了测定任务，并巩固了坐标纸做图、回归等数据处理方法，为以后进行的电学实验打下了基础。

6 致谢

感谢马平老师对实验的详细指导，感谢王悦晨同学交换使用实验部分仪器。

附：实验测定各元器件的伏安曲线图（见后）