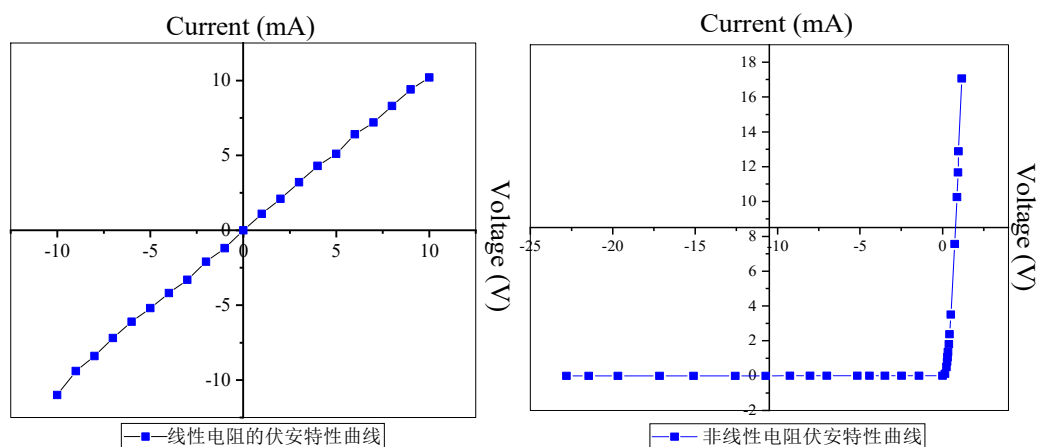


## 实验 8 非线性元件的伏安特性

当具有两个电极的电子元件两端加上直流电压，在电子元件中就会有电流通过。电子元件两端的电压与所通过的电流之间的关系成为电阻元件的伏安特性。电压-电流关系曲线为线性时的电子元件称为线性电阻，满足欧姆定律。反之，电子元件称为非线性元件，例如半导体二极管、晶体管、白炽灯中钨灯丝。这类非线性元件通常只允许电流由单一方向流过，因而具有整流（Rectifying）功能。利用伏安特性所显示出来的依赖规律特性，建立与一定的物理过程之间的相互联系，人们进一步研制出各种新型的传感器、换能器，广泛用于探测压力、光强、磁场等物理量的探测和自动化控制。因此，对非线性电阻伏安特性及规律的研究，有助于理解偏压下半导体异质结的物理过程、电学规律及其应用前景。



### 【实验目的】

1. 掌握伏安法研究二极管的正向伏安特性;
2. 了解二极管的单向导电特性，学会由曲线提炼二极管关键特性参数;
3. 理解正确选择测量电路以减少伏安法中的系统误差.

## 【实验仪器】

待测二极管和电阻若干、电流表、电压表，可编程直流电源.

## 【实验原理】

某一个金属导体，在温度没有显著变化时，电阻是不变的，它的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线，具有这种伏安特性的电学元件叫做线性元件. 因为温度可以决定电阻的大小. 除金属外，欧姆定律对电解质溶液也适用，但对气态导体（如日光灯管、霓虹灯管中的气体）和半导体元件并不适用，这类电学元件叫做非线性元件. 本实验主要以二极管作为非线性电阻元件开展实验.

### 1. PN 结的形成

#### (1) P 型半导体和 N 型半导体

P 型半导体其空穴浓度远大于自由电子浓度的杂质半导体. 空穴主要由杂质原子提供,自由电子由热激发形成. 如含有适量+3 价元素硼、铟、镓等的锗 (Ge) 或硅 (Si) 半导体. N 型半导体被称为电子型半导体，其自由电子浓度远大于空穴浓度的杂质半导体. 如含有适量+5 价元素磷、砷、锑等的 Ge 或 Si 等半导体.

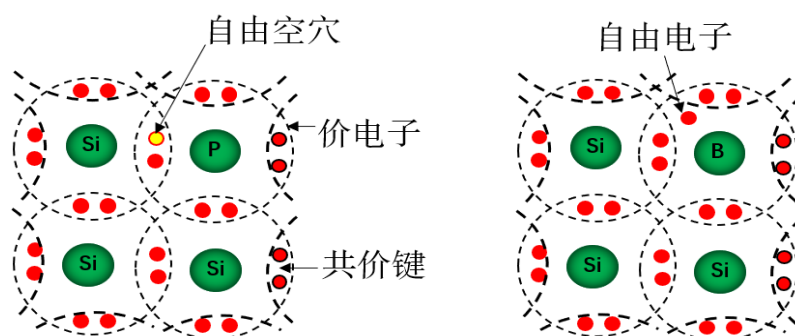


图 5.8.1: P 型和 N 型半导体

#### (2) PN 结的形成过程

当 P 型和 N 型半导体接触后，二者会在接触界面形成接触结。交界面两侧存在着两种载流子的浓度差。N 区多数载流子（电子）必然越过界面向 P 区扩散，在 N 区一侧留下不能移动的正离子；同样，在 P 区一侧留下不能移动的负离子。这些不能移动的带电离子组成空间电荷区，形成了由 N 区指向 P 区的内电场。随着扩散的进行，空间电荷区加宽，内电场增强，阻碍多数载流子进一步扩散，促使少数载流子定向运动产生漂移。当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时，形成稳定空间电荷区，即 PN 结。

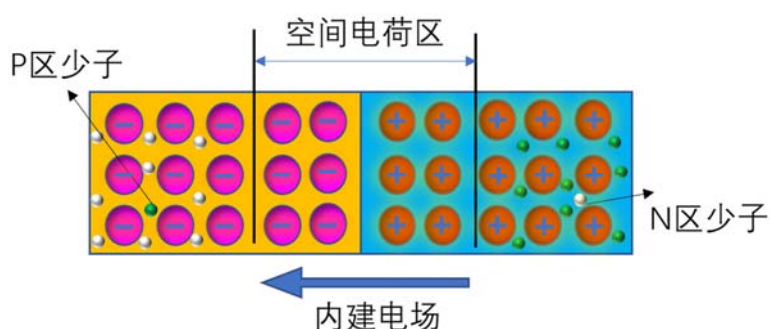



图 5.8.2: PN 结的形成

### (3) PN 结的单向导电性和反向击穿特性

在无光照、加热、电场等外界物理场激发因素条件下，扩散运动与漂移运动处于动态平衡，通过 PN 结的总电流为零。当正向偏置时（P 接正，N 接负），PN 结空间电荷区被压缩，正向偏置电压几乎全部加在 PN 结两端。外电场抵消内建电场，原有动态平衡被打破，扩散运动大于漂移运动，正向回路形成较大正向电流。反之，反向偏置时，漂移运动大于扩散运动，通过 PN 结电流很小，主要由少数载流子形成的漂移电流贡献，即反向电流。由于当外加电压在一定范围内变化时，反向电流很快就不再增加了，几乎不随外加电压的变化而变化，即反向电流饱和（ $I_R$ ）。电流只能沿一个方向流过 PN 结，此现象称为单向导电性。然而，反向电压大到一定数值时，PN 结电阻会突然变得很小，反向电流会

骤然增大，二极管失去单向导电特性，即 PN 结反向击穿（“热击穿”）。开始击穿时的临界电压叫反向击穿电压。因此，实际实验中要时刻注意不要超过该电压数值，保持二极管工作在安全范围。

## 2. 二极管的伏安特性

半导体二极管主要是依靠 PN 结而工作的，其专用符号为 。其伏安特性曲线如图所示。由图 5.6.3 二极管的动态电阻  $R_d$  ( $R_d = \Delta U_D / \Delta I_D$ ) 的变化规律：

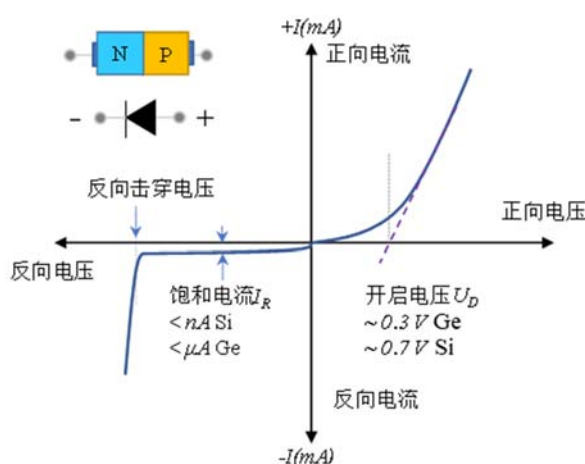


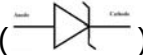
图 5.8.3: 二极管伏安特性曲线

- (1) 在正向电压较小时，电流较小，二极管内阻较大。
- (2) 当正向电压加大到某一数值  $U_D$  时，正向电流明显增大，随着电压加大，电流急剧增大，二极管电阻变得很小，二极管呈导通状态。  $U_D$  称为二极管的正向导通电压。由伏安曲线的反向延长与横轴交点即为  $U_D$ 。（硅二极管，  $U_D$  约为 0.6~0.8 V；锗二极管，  $U_D$  约为 0.2~0.4 V）
- (3) 反向电压较小时，电流也较小，此时二极管呈高阻状态，即截止状态。
- (4) 随着电压增大，电流趋近最大值  $I_S$ 。反向电流  $I_R$  越小，意味着二极管的单向导电性就越好。（硅二极管，  $I_R \sim \text{nA}$ ；锗二极管，  $I_R \sim \mu\text{A}$ ）。

(5) 当反向电压超过某一数值  $U_B$  时, 电流急剧增大, 电阻趋近于零. PN 结被反向击穿,  $U_B$  称作反向击穿电压.

### 3. 稳压二极管及稳压特性

稳压二极管 (Zener voltage) 与普通二极管不同, 稳压二极管是利用保持端电压基本恒定、限制击穿时的电流不超过允许值. 稳压二极管工作在反向击穿区. 稳压管的反向击穿是可逆的, 即去掉反向电压, 稳压管又恢复正常. 但如果反向电流超过其允许范围, 稳压管同样会因热击穿而损坏. 稳压二极管的符号

()、伏安特性曲线如图所示:

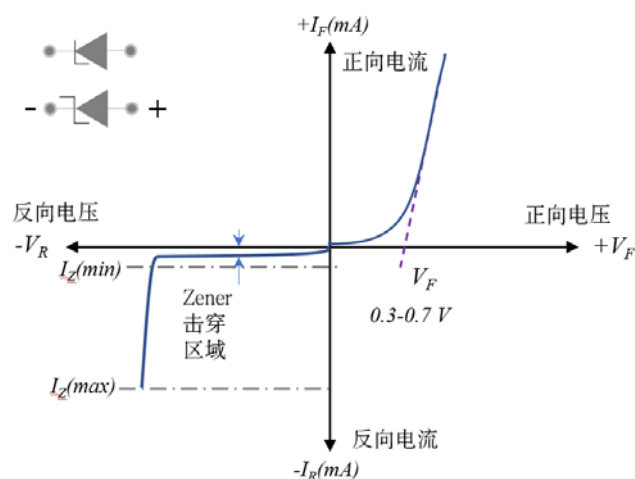


图 5.8.4: 稳压二极管的伏安特性

由图可知: (1) 稳压二极管的正向伏安特性曲线与普通二极管的类似. (2) 达到反向击穿电压之后, 其特性曲线比较陡直, 即反向电流变化而反向电压基本不变. 在稳压值附近一个很宽的电流范围内 ( $I_{Zmin}-I_{Zmax}$ ), 改变外加电压, 仅引起通过稳压二极管的电流变化, 而稳压管的端电压将维持恒定.

一般取电流  $I_Z = \frac{1}{2}(I_{Zmin} - I_{Zmax})$  所对应的电压值  $V_Z$  作为稳压二极管的稳压值. 稳压值  $V_Z$  和最大稳定电流  $I_{Zmax}$  是稳压二极管的主要参数. 稳压二极管在工作时应反接, 并串联限流电阻, 以确保工作电流不超过最大稳定电流  $I_{Zmax}$ .

#### 4. 电表连接方法与分压电路设计

通常测量二极管伏安特性时电表连接方法有两种: 电流表外接、电流表内接, 均会引入一定的系统误差.

##### (1) 电表连接方法

由于电表内阻的影响, 两种接法均会引入一定的系统误差 (或接入误差) .

① 电流表内接时, 由于电流表内阻  $R_A$  不为零, 所以  $U = I(R_A + R_x)$ , 二极管内阻测量值  $(R_A + R_x)$  大于实际值  $R_x$ . 测量的绝对误差为  $R_A$ , 相对误差  $\Delta R_x / R_x = R_A / R_x$ .

② 电流表外接时,  $I = I_V + I_x = U(\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_x})$ , 由于电压表内阻  $R_V$  不是无限大, 所以二极管内阻的测量值  $R_x \square (\frac{R_V}{R_x + R_V})$  会小于实际值  $R_x$ . 测量相对误差  $\Delta R_x / R_x = -R_x / (R_x + R_V)$ .

③ 因为电流表内接和外接都有测量误差, 测量时一般是先把接法造成的误差计算出来, 然后选用测量误差较小的接法. 若  $R_x / R_V > R_A / R_x$  则选用电流表内接, 反之则选用电流表外接.

如表 5.6.1 所示, 相比之下, 比电压表“活接法”更简便实用的是另一种连接方式——电压表“活接法”. 为排除电流测量时电压表的影响, 只将电流表串入电路, 测量电压时才将电压表并在二极管两端.

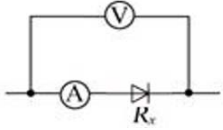
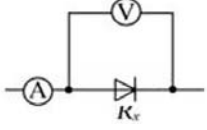
	内接法	外接法
电路图		
误差原因	电流表的分压 $U_{\text{测}} = U_x + U_A$	电压表的分流 $I_{\text{测}} = I_x + I_V$
电阻测量值	$R_{\text{测}} = \frac{U_{\text{测}}}{I_{\text{测}}} = R_x + R_A > R_x$ 测量值大于真实值	$R_{\text{测}} = \frac{U_{\text{测}}}{I_{\text{测}}} = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} < R_x$ 测量值小于真实值
适用条件	$R_A \leq R_x$ , 测大电阻	$R_A \geq R_x$ , 测小电阻

表 5.8.1: 电表内外接对比

本实验中可直接采用电流表外接的连接方式.

**【实验内容】**

1. 二极管基本参数测量与性能判断
2. 稳压二极管正向、反向伏安特性测量

**【实验步骤与数据记录】**

1. 二极管压降测量和正反向阻值确定

在元件盒中选取稳压二极管，选择数字万用表二极管专用档位测量二极管正向压降，若有观察到压降数值（单位 V），这说明红色表笔对应正极，否则为负极，此时的数值即为正向压降数值。



图 5.8.5: 万用表二极管正负极判断及正向压降测量

## 2. 稳压二极管伏安特性测量

(1) 在元件盒中选取 $\sim 100\Omega$ 电阻作为串联限流电阻。参考图 5.8.6 电路图，将电流表外接，设定合适的电表量程档位测量，测量正向伏安特性。注意在开启电压处电流迅速增大，不要超过元件可承受的功率。

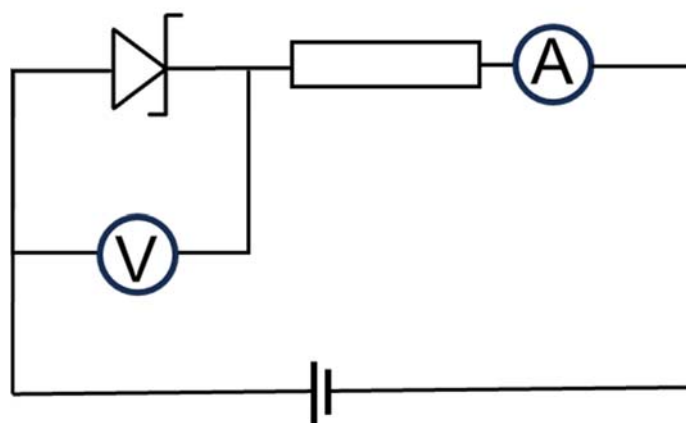


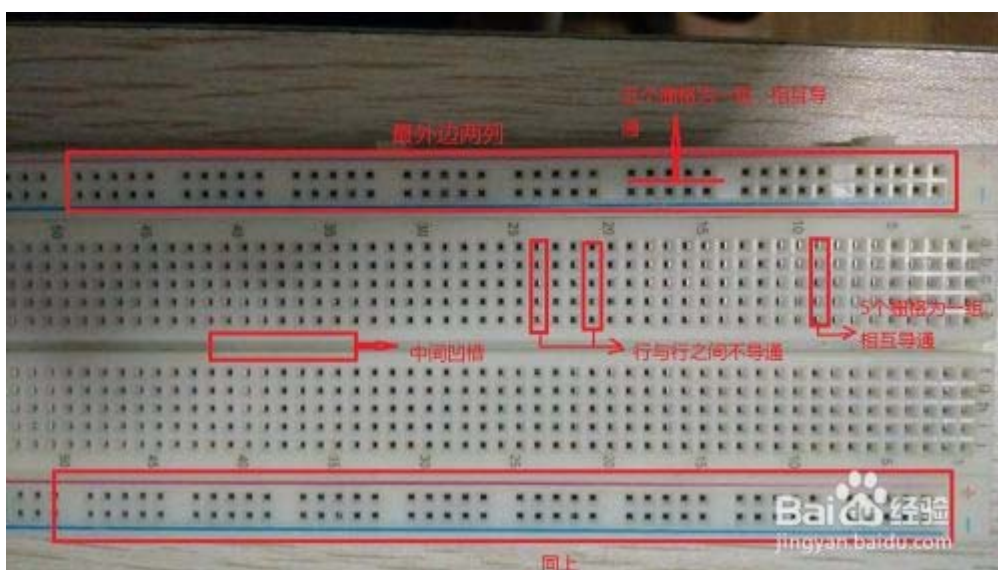
图 5.8.6: 稳压二极管正向偏压测量电路

(2) 参考上图，画出反向偏压电路图，测量稳压二极管的反向伏安特性。

(小技巧是直接将电源、电压、电流表正负极对换位置) 注意在反向击穿电压处电流迅速增大，不要超过元件可承受的功率。



(3) 本实验采用面包板进行电路连接, 面包板的导通情况见图 5.8.7。(可



下表为本实验数据记录参考表格（注意 0 点附近数据不能缺少）

$U(V)$	$I(mA)$	$U(V)$	$I(mA)$
0.5	0.05	0.5	0.05
1.0	0.10	1.0	0.10
1.5	0.15	1.5	0.15
2.0	0.20	2.0	0.20
2.5	0.25	2.5	0.25
3.0	0.30	3.0	0.30
3.5	0.35	3.5	0.35
4.0	0.40	4.0	0.40
4.5	0.45	4.5	0.45
5.0	0.50	5.0	0.50
5.5	0.55	5.5	0.55
6.0	0.60	6.0	0.60
6.5	0.65	6.5	0.65
7.0	0.70	7.0	0.70
7.5	0.75	7.5	0.75
8.0	0.80	8.0	0.80
8.5	0.85	8.5	0.85
9.0	0.90	9.0	0.90
9.5	0.95	9.5	0.95
10.0	1.00	10.0	1.00

表 2: 反向伏安特性曲线 (电压间隔~0.5V)

---

---

### 3. 数据处理与作图分析

(1) 采用上述数据作图，在同一个坐标系中作出二极管的正、反向伏安特性曲线。

(2) 由伏安特性曲线求出二极管的正向导通电压  $U_D$  和反向击穿电压  $U_B$ 。

#### 【注意事项】

1. 不得在电路通电情况下使用万用表专用档位测试二极管。
2. 实验中电源输出电压前务必将预置电压归零。

#### 【思考题】

1. 请描述限流电阻的作用，并且说明本实验如何避免电流快速增大导致的元件的烧毁。
2. 二极管的单向导通作用有什么用途？

## 【物理史话】(<800 字)



图 5.8.6 半导体二极管和真空二极管

半导体产业是目前世界上发展最快、最具影响力的产业之一，不仅带来了世界经济与技术的飞速发展，而且也带来了整个社会的深刻变革，二极管是世界上第一种半导体器件。

1873 年，弗雷德里克·格思里 (Frederick Guthrie) 发现了热离子二极管的基本操作原理。他发现了当白热化的接地金属接近带正电的验电器时，验电器的电会被引走。这表明了电流只能向一个方向流动。1880 年，托马斯·爱迪生也发现了这一规律。他利用密封了金属板的特殊玻璃外壳灯泡证实，发光灯丝会有一种无形的电流穿过真空与金属板连接，但只有当板被连接到正电源时才会发生。爱迪生随即发明了一种电路，他的特殊灯泡有效地取代了直流电压表中的电阻。

20 年后，约翰·弗莱明 (爱迪生前雇员) 发现了这一效应的实用价值，它可以用来制作精确检波器。1904 年 11 月 16 日，第一个真正的热离子二极管——弗莱明管，由弗莱明在英国申请了专利。

1906 年，德佛瑞斯特在二极管的灯丝和板极之间巧妙地加了一个栅板，从而发明了第一只真空三极管。真空管有三个元件，由一个栅极和两个被栅极分开的电极在玻璃密封的空间中构成。密封空间内部为真空，以防止元件烧毁并易于电子的移动。真空三极管不仅反应更为灵敏、能够发出音乐或声音的振动，而且集检波、放大和振荡三种功能于一体。因此，许多人都将三极管的发明看作电子工业真正的诞生起点。真空三极管使得收音机、电视和其他消费类电子产品成为可能。它也是世界上第一台电子计算机的大脑，这台被 ENIAC 的计算机于 1947 年在美国宾西法尼亚的摩尔工程学院进行了首次演示。现如今的二极管大多是使用硅、锗来生产，目前最常见的结构是 PN 结连接到两个电终端。