



PN结特性和玻尔兹曼常数测定

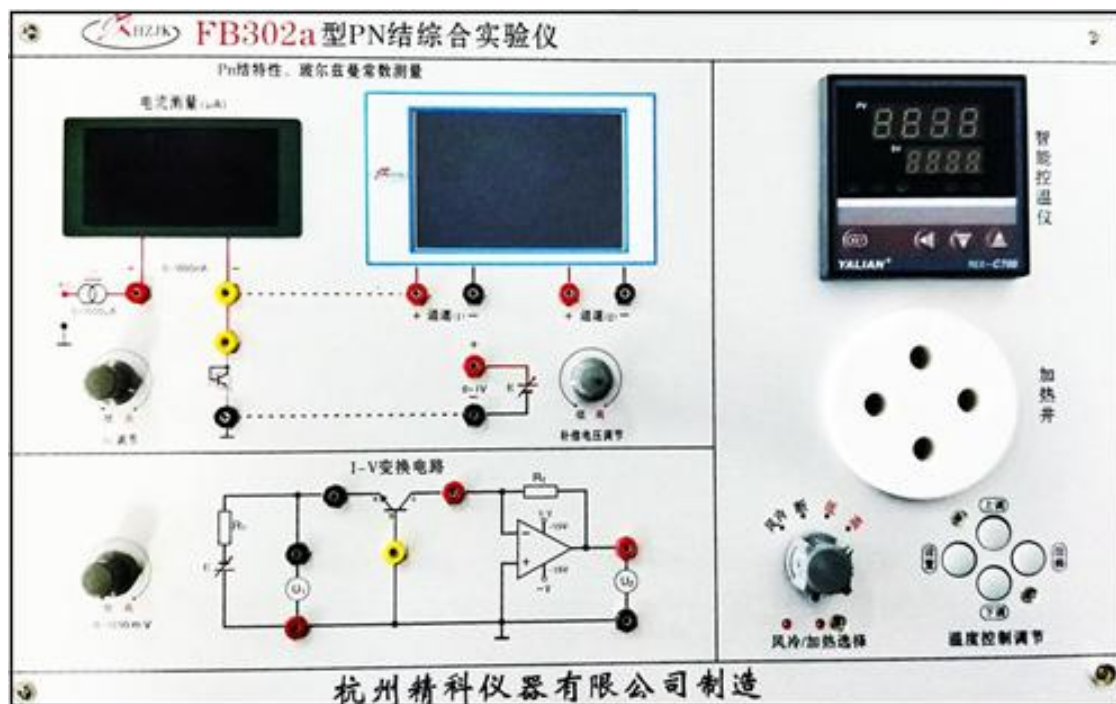
青岛理工大学物理实验中心

一、实验目的

- 1、理解PN结温度特性原理；
- 2、测量玻尔兹曼常数。

二、实验仪器

FB302a型PN结综合实验仪、TIP31传感器、PN结传感器等。



三、相关概念

- 价带 (Valence band) : 与价电子能级相对应的能带称为价带。
- 导带(conduct band): 价带以上能量最低的允许带称为导带。
- 禁带(band gap): 导带与价带之间的不存在薛定谔方程本征解得能量区间称为禁带。

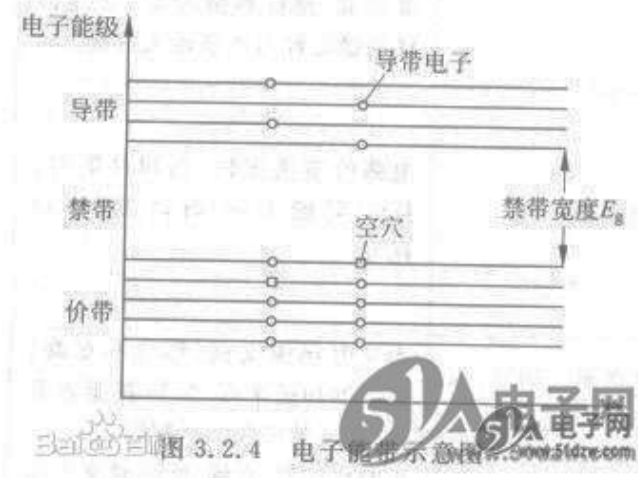
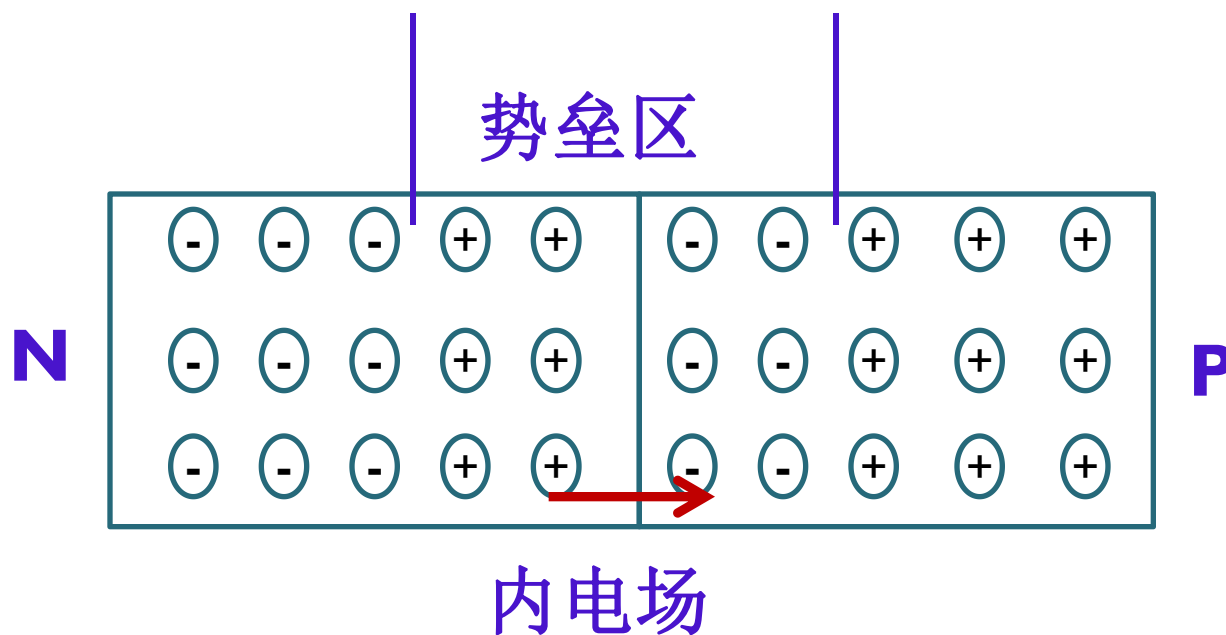


图 3.2.4 电子能带示意图

- PN结：导电载流子为空穴的P型半导体在与多数载流子是电子的N型半导体“接触”后，由于电子和空穴密度差的存在，将使电子自N区向P区扩散，空穴自P区向N区扩散，结果在交界处形成电荷区，这就是PN结。



三、实验原理

- PN结温度传感器的基本方程

$$V_F = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right)T - \frac{kT}{q} \ln T^r = V_1 + V_{n1}$$

- 其中

$$V_1 = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right)T \quad \text{线性项}$$

$$V_{n1} = -\frac{kT}{q} \ln T^r \quad \text{非线性项}$$

三、实验原理

1. PN 结伏安特性与玻尔兹曼常数测定

由半导体物理学可知，PN 结的正向电流-电压关系满足：

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU_{be}}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

式(1)中 I 是通过 PN 结的正向电流， I_0 是不随电压变化的常数， T 是热力学温度， e 是电子的电量， U 为 PN 结正向电压降。由于在常温 ($T \approx 300K$) 时， $kT/e \approx 0.026V$ ，而 PN 结正向电压下降约为十分之几伏，则 $e^{\frac{eU_{be}}{kT}} \gg 1$ ，于是有：

$$I = I_0 e^{\frac{eU_{be}}{kT}} \quad (2)$$

也即 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 。在测得温度后，就可以得到常数，把电子电量作为已知值代入，就可以求得玻尔兹曼常数，测得的玻尔兹曼精确值为 $k=1.381 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ 。

为了精确测量玻尔兹曼常数。不用常规的加正向压降测正向微电流的方法，而是采用 $1nA \sim 1mA$ 范围的可变精密微电流源，能避免测量微电流不稳定，又能准确地测量正向压降。

三、实验原理

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(4-10-2)式；

[2] 耗尽层符合电流，它正比于 $\exp(eU/2 kT)$ ；

[3] 表面电流，它是由Si和SiO₂界面中杂质引起的，其值正比于 $\exp(eU/m kT)$ ，一般 $m > 2$ 。

因此，为了验证(4-10-2)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(4-10-2)式。实验线路如图4-10-1所示。

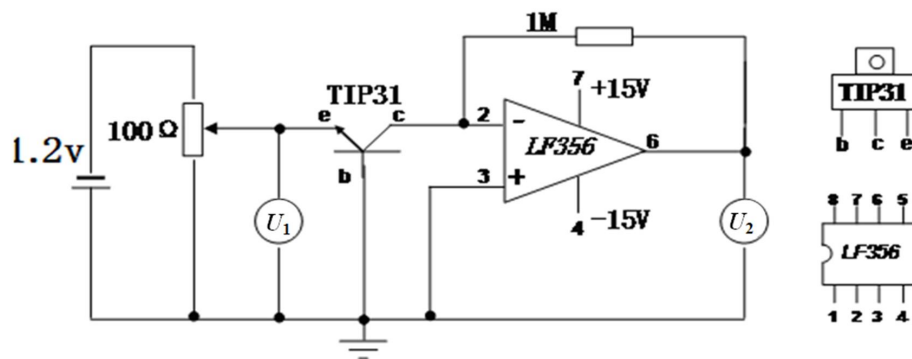


图 4-10-1 PN 结扩散电流与结电压关系测量线路图

三、实验原理

2. 弱电流测量

以前常用光点反射式检流计测量 $10^{-6}A\sim 10^{-11}A$ 量级PN扩散电流，但该仪器有许多不足之处且易损坏。本仪器没有采用高输入阻抗运算放大器组成电流-电压变换器(弱电流放大器)测量弱电流信号，温漂大、读数困难等。为了更精确地测量玻尔兹曼常数，而设计了一个能恒流输出 $1nA\sim 1mA$ 范围的精密微电流源。解决了在测量中很多不稳定因素，能准确地测量正向压降。

3. PN结的结电压 U_{be} 与热力学温度 T 关系测量

PN结通过恒定小电流(通常电流 $I=1000\mu A$)，由半导体物理可知 U_{be} 和 T 近似关系：

$$U_{be} = ST + U_{go} \quad \dots (3)$$

式(3)中 $S \approx -2.3mV/^{\circ}C$ 为PN结温度传感器灵敏度。由 U_{go} 可求出温度OK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、实验步骤

1. NPN 三极管的 bc 极短路, be 极成一个 PN 结(已接好), 用二色长导线连接测量仪, PN 结可方便地插入加热井。

2. “风冷/加热选择”开关处“断”位, 此时测试仪上将显示出室温为 T_R 。

3. $V_F(0)$ 或 $V_F(T_R)$ 的测量和调零:

按下图接线(通道 1 和“补偿电压”), 调“ I_F 调节”使 $I_F = 50\mu\text{A}$; 按液晶屏显示的“2 数据记录仪”按钮, 进入后, 记下液晶屏显示“1.XXX V”的 $V_F(T_R)$ 值, 调“补偿电压调节”使显示为 0, $V_F=0$ 。

4. 测定 $\Delta V - T$ 曲线:

开启“风冷/加热选择”开关置“低”位置(若气温低加热慢, 可置“高”), 进行变温实验, 并记录对应的 ΔV 和 T , 至于 ΔV 、 T 的数据测量, 采用每改变 10mV 立即读取一组 ΔV 、 T 值, 这样可以减小测量误差。应该注意: 在整个实验过程中要注意升温速率要慢, 且温度不宜过高, 最好控制在 100°C 以内。

5. “ I_F 调节”使 $=100\mu\text{A}$, 重复以上步骤(转换至“风冷”, 待温度降低至室温后进行)。

四、实验步骤

6. 求被测 PN 结正向压降随温度变化的灵敏度 $S(\text{mV}/^\circ\text{C})$ 以 T 为横坐标, ΔV 为纵坐标, 作 $\Delta V-T$ 曲线, 其斜率就是 S 。

7. 估算被测 PN 结材料的禁带宽度。根据

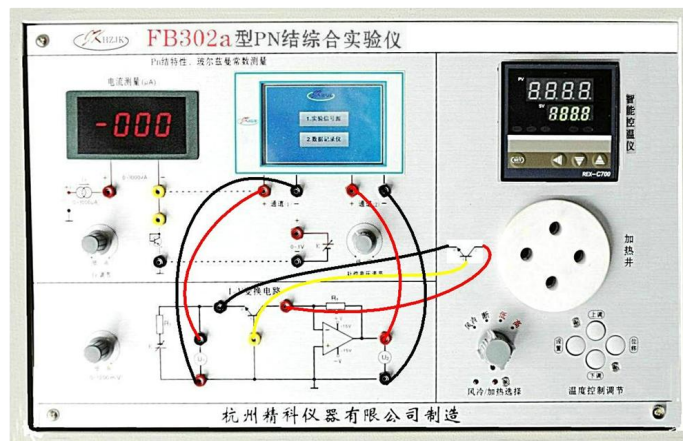
$$V_{g(0)} = V_{F1} - \frac{\partial V_{F1}}{\partial T} T_1 = V_{F1} S T_1$$

实际计算时将斜率 S 、温度 T_1 (注意单位为 K) 及此时的 V_{F1} 值代入上式即可求得 $V_{g(0)}$, 禁带宽度

$E_{g(0)} = qV_{g(0)}$ 。将实验所得的 $E_{g(0)}$ 与公认值 $E_{g(0)} = 1.21\text{eV}$ 比较, 求其误差。

四、实验步骤

8. 玻尔兹曼常数测量



按上图接线，采用硅三极管接成共基极线路、I-V变换电路，注意：三色长导线的插头要插入对应颜色的插座；用二连接线接通道1至 U_1 二端，另二连接线接通道2至 U_2 二端。

按“记录间隔”，选择记录时间间隔(1~10S、Enter)；“单位设置”选“V”；按“记录/暂停”，开始显示二个通道电压和进行的时间，并据所选记录间隔开始记录数据。

调温度 30.0℃ 附近，稳定 3 分钟不变，才进行测量。调“0~1200mV”旋钮，从 300mV 起，每调 10mV，读 U_1 和 U_2 电压值，测量并记录，直至 U_2 值达到饱和 (U_2 值变化较小或基本不变)。(U_1 的起、终点以具体的实验情况来判断)。

四、实验步骤

按“记录/暂停”，测量暂停；按“数据查询”液晶屏显示所记录的数据(若数据多，可按“数据查询”翻页)，按“返回”后，再按“数据作图”，液晶屏显示曲线(按“数据查询”翻页)。

调整温度为60.0 °C附近重复以上测量并分析比较测量结果。

调整温度为XX °C(自选)附近重复以上测量并分析比较测量结果。

用作图法画出两个不同温度下的 U_{bc} 与 I (由 U_2 可算出对应的 I ($I_S = U_0/R_f$))

的关系曲线，应为一一直线，求出其斜率，进而求得波尔兹曼常数 K ，并与公称值进行比较。

五、数据记录

表4-10-1 PN结温度特性测试实验数据表

测试条件			测试条件		
0			0		
10			10		
20			20		
30			30		
40			40		
50			50		
60			60		
70			70		
80			80		
90			90		
100			100		
110			110		
120			120		
130			130		
140			140		
150			150		
160			160		
170			170		
180					
190					

根据表格记录的数据,用excel作图,并写出线性方程和相关系数。

注: r 的数值取决于少数载流子迁移率对温度的关系,通常取 $r=3.4$ 。

五、数据记录

表4-10-2 玻尔兹曼常数测试实验数据表

U_1	U(V)-30°C	U(V)-60°C	U(V)-XX°C
300			
310			
320			
330			
340			
350			
360			
370			
380			
390			
400			
410			
420			
430			
440			
450			
...			

六、注意事项

1. 仪器应存放于温度为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $30\% \sim 85\%$ 的环境中，避免与腐蚀性的有害物质接触，并防止剧烈碰撞。
2. 需要加热并迅速降温，可打开风扇开关，强制散热。

相关物理量

- VF-PN结正向电压
- IF-PN结正向电流
- $V_g(0)$ -在热力学温度为0K时，PN结材料的导带底和价带顶之间的电势差。
- C-PN结与某些特性相关的常数
- K-玻尔兹曼常数
- γ -在一定条件下的特定常数
- Q-电子电量