

DH-PN-2 型 PN 结正向特性综合实验仪

半导体产业已经成为基础产业,而现有的物理实验中涉及半导体物理的比较少。实际上,大家常见的热敏电阻也属于半导体器件,但往往只是测量了它的温度特性,没有涉及其半导体原理。本仪器从物理实验的需求出发,以最基本的 PN 结半导体器件,可开设 PN 结半导体物理实验。即根据 PN 结的正向压降与其正向电流、温度的关系,研究 PN 结的伏安特性,测量波尔兹曼常数,估测半导体材料的禁带宽度,从而很好地学习和掌握一些重要的半导体物理知识。

仪器由两个部分组成:温控仪和实验仪。温控仪采取开放式设计,采用 PID 控温技术,干式金属体热源,具有安全可靠、无污染等特点。PN 结传感器不但可以用于实验,定标后也可以用于实际温度测量。

总之,本仪器是一套精心设计的半导体物理实验仪器,不但思路独特,而且性能稳定,测量精度好,适用于大专院校普通物理实验和有关专业的半导体物理实验。

一、可开设的实验

- 1、测量同一温度下,正向电压随正向电流的变化关系,绘制伏安特性曲线;
- 2、在同一恒定正向电流条件下,测绘 PN 结正向压降随温度的变化曲线,确定其灵敏度,估算被测 PN 结材料的禁带宽度;
- 3、学习用 EXECL 进行指数函数的曲线回归的方法,并计算出玻尔兹曼常数;
- 4、探究:用给定的 PN 结测量未知温度。

二、主要技术性能

本仪器由两部分组成:

一)、DH-SJ5 温度传感器实验装置

本装置是以 Pt100 为温度传感器,测量和控制温度的,该温度传感器可以插入由金属铜块构成的温度源,配合 PID 控温仪,就可进行温度的测量和控制。

装置具有以下的特点:

- 1、控温精度高、范围广、加热所需的温度可自由设定,采用数字显示。
- 2、使用低电压恒流加热、安全可靠、无污染。加热电流连续可调。
- 3、提供的是通用式的温度源,有多个温度插孔,可方便地插入被测传感器。例如,除 PN 结传感器外,用户可根据自有条件,用来测量热敏电阻 (NTC 和 PTC)、铜电阻 Cu50、铜-康铜热电偶、AD590 和 LM35 等温度传感器,所以具有很好的拓展性。
- 4、加热部分配有风扇,在做降温实验过程中可采用风扇快速降温。

装置的主要技术指标:

- 1、电源电压: AC220V \pm 10%(50/60Hz)
- 2、工作环境: 温度 0~40 $^{\circ}$ C,相对湿度 $<$ 80%的无腐蚀性场合
- 3、测控温传感器: Pt100,控温范围: 室温~120 $^{\circ}$ C,温度控制精度: \pm 0.2 $^{\circ}$ C,分辨率: 0.1 $^{\circ}$ C,控制方式: PID 控制。

4、默认配备的传感器：2个PN结传感器：S9013，C1815，均由小功率NPN晶体三极管的CB结短路而形成的PN结。

二)、PN结正向特性综合实验仪

实验仪独创地将测量玻尔兹曼常数和禁带宽度的实验内容统一到一个实验过程中，只需测量出正向电压随正向电流的变化曲线即可。为了更精确地测量玻尔兹曼常数，没有采取常规的加正向压降测正向微电流的方法，而是特别设计了一个能稳定输出1nA~1mA范围的精密微电流源，避免了因测量微电流跳字、不稳定而引起的误差，只要能测量出准确的正向压降就可测得实验曲线。另外，根据较为精确的推导，在常温下就能估测出绝对零度时硅材料的禁带宽度，而不需要在冰水混合物中测量，不但简化了测量方法和过程，而且避免了由于冰水混合物温度失准带来的误差。

实验仪的主要技术指标：

- 1、电流输出范围1nA~1mA分4段可调，调节细度：最小1nA，开路电压：约5V；
- 2、微电流显示范围：1nA~1999 μ A，分辨率10⁻⁹A；微电流精度：0.3% \pm 2个字；
- 3、正向压降测量范围：0~2V，分辨率：1mV；电压测量精度：0.3% \pm 2个字；
- 4、工作环境：温度0~40 $^{\circ}$ C，相对湿度<85%的无腐蚀性场合。

三、使用方法

一)、温控仪与恒温炉的连线，如图1

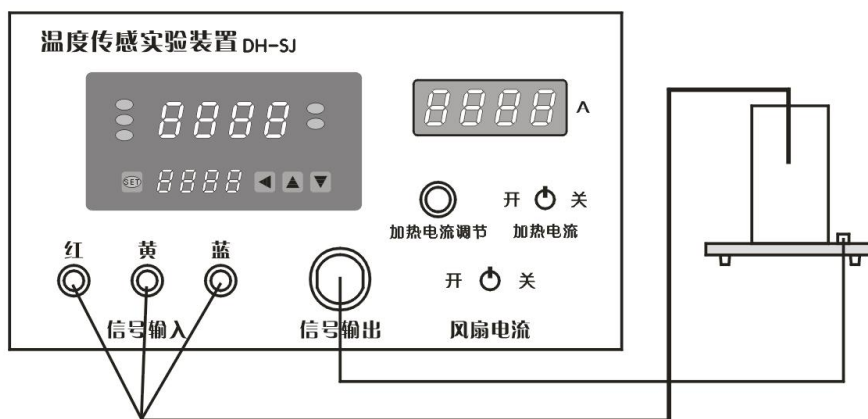


图1 温控仪与恒温炉的连线

注意：Pt100的插头与温控仪上的插座颜色对应得相连接。红→红；黄→黄；蓝→蓝。

警告：在做实验中或做完实验后，禁止手触传感器的钢质护套，以免烫伤！

二)、温控表的使用方法

温度的测量以Pt100作为温度传感器，温控表内部使用PID控制温度，其相应的参数可以修改。温控表的使用操作方法见图2。

附加说明：

1) 主控设定状态时，只要按“SET”键和三个方向功能键组合使用，调整好需要的温度即可，再按“SET”键即可返回正常的控制显示状态

2) 第二设定状态一般情况下不需要更改，也不建议自行更改，如确需更改，长按“SET”键5秒，即可进入设置菜单。

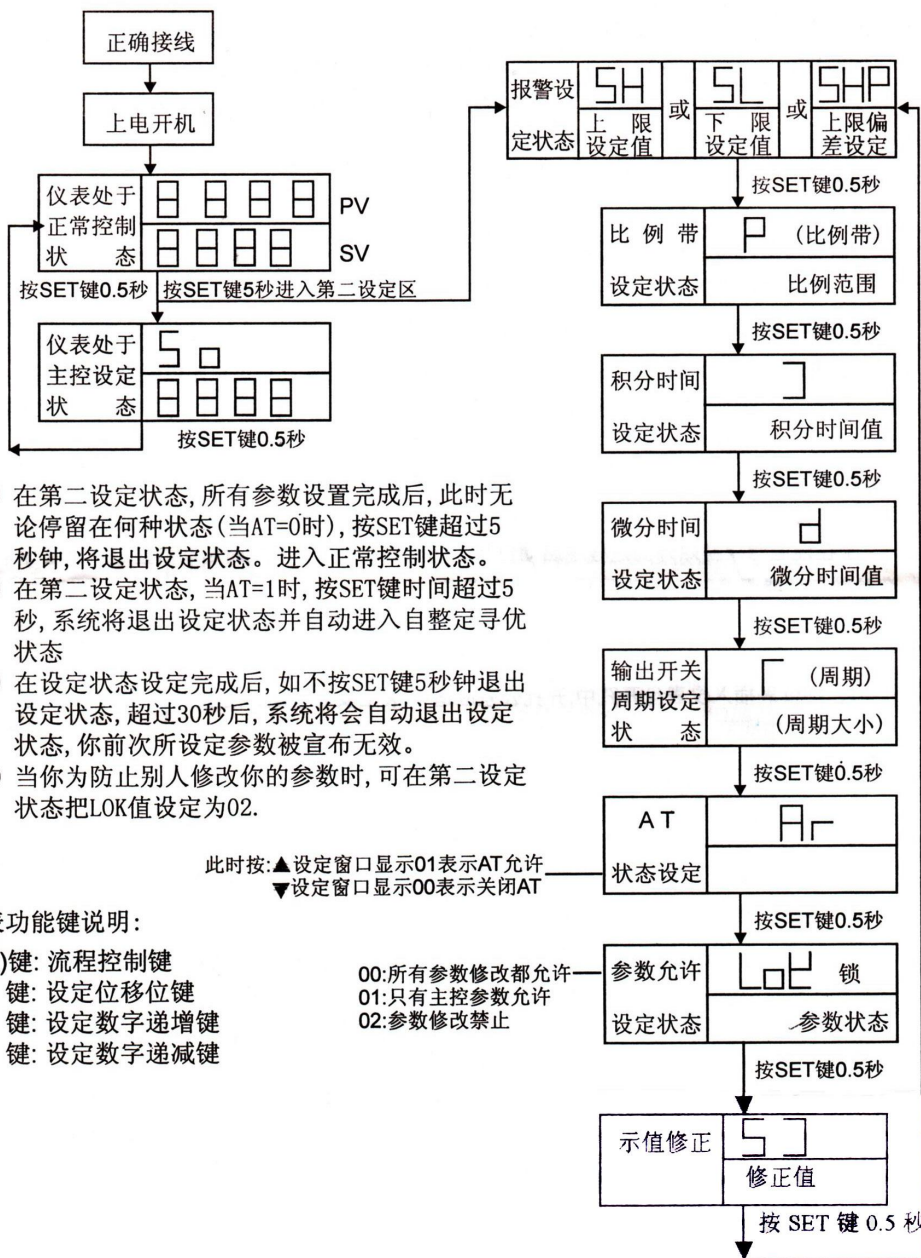


图 2 温控仪的使用方法

三) DH-SJ 温度传感器实验装置的使用

- 1、将 Pt 铂电阻传感器插入温度传感器实验装置的加热炉孔中。
- 2、控温“加热电流”开关置“关”位置，接上加热电源线和信号传输线，两者连接均为直插式。在连接和拆除信号线时，动作要轻，否则可能拉断引线影响实验。
- 3、插上电源线，打开电源开关，预热几分钟，待温度传感器实验装置所示温度值稳

定之后，此时显示即为室温 T_R ，可记录下起始温度 T_R 。

4、“加热电流”开关置“开”位置，根据需要的温度，转动“加热电流调节”电位器，选择合适的加热电流大小。目标温度高，加热电流适当大点，目标温度低，加热电流要小一点。

5、将 PN 结温度传感器插入温度传感器实验装置的加热炉孔中。

6、PN 结管上的有两组线共 4 个插头，将对应颜色的插头接入 PN 结实验仪上的相应颜色的插孔中。

7、实验结束后，或者需要降温时，接通“风扇电流”开关即可。

四) PN 结正向特性综合实验仪的使用

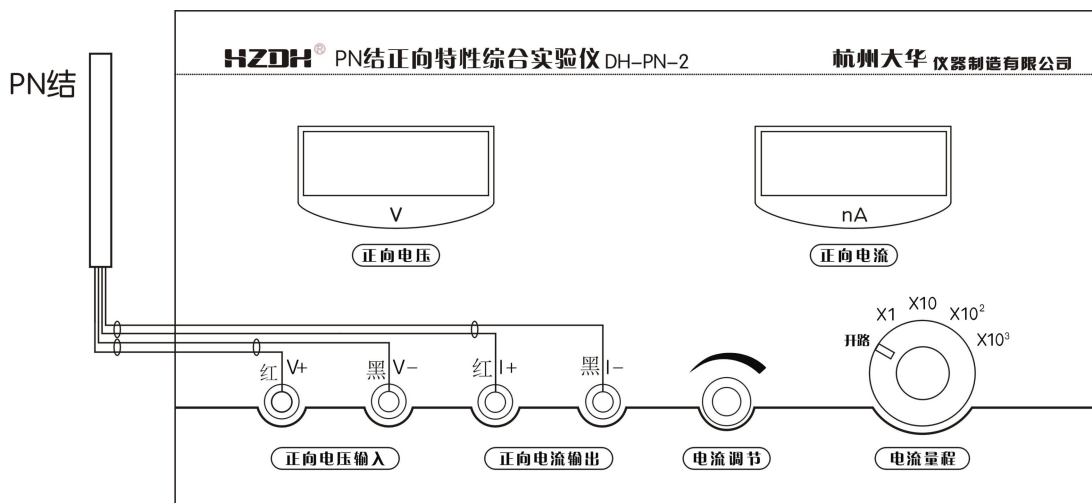


图 2 PN 结传感器与 PN 结实验仪的连接

PN 结传感器与 PN 结实验仪的连接如图 2。

“正向电流”数显表显示的是 PN 结的正向电流。“正向电压”数显表显示的是 PN 结的实时正向电压。

微电流源的有效量程分为 4 个档位，范围从 $1\text{nA} \sim 1\text{mA}$ 分段可调。开路档时正向电流源出为 0。电流量程档位与正向电流大小之间的关系是这样的：正向电流表显示的数值 \times 开关所处的档位值，例如，若正向电流表此时显示：100，电流量程开关所处的档位： $\times 10$ ，那么此时的正向电流 $I=100 \times 10=1000\text{ nA}$ ，注意单位是 nA。电流表最大显示是 0 \sim 1999，电流量程档位 $\times 1$ ， $\times 10$ ， $\times 10^2$ ， $\times 10^3$ 对应为 $1.999\mu\text{A}$ ， $19.99\mu\text{A}$ ， $199.9\mu\text{A}$ ， 1.999mA 。

四、注意事项

1、在选择电流量程时在保证测量范围的前提下尽量选择小档位，以提高精度。

2、为了保证微电流源的准确性，仪器内部显示电路与微电流源是不共地的，所以与常规电流源不同的是：当负载开路时显示的电流信号不为零。这是正常的，并且也有一个好处是我们可以在不接负载时就能预先设定需要的电流。

3、仪器出厂时已经校准。请不要用普通的万用表或其他仪器，直接测量或比对 PN 结的正向电压和正向微电流，否则会得到失准的结果，原因是 PN 结实验时处于高阻状态。

- 4、仪器的电压表测量电压量程仅为 2V，请不要超量程使用或测量其他未知电压。
- 5、仪器的连接线要注意使用，有插口方向的对齐插拔，插拔时不可用力过猛。
- 6、加热装置温升不应超过+120℃，否则将造成仪器老化或故障。
- 7、使用完毕后，一定要切断电源。并存放于干燥、无灰尘、无腐蚀性气体室内。

实验讲义 PN 结正向特性的研究和应用

PN 结作为最基本的核心半导体器件，得到了广泛的应用，构成了整个半导体产业的基础。在常见的电路中，可作为整流管、稳压管；在传感器方面，可以作为温度传感器、发光二极管、光敏二极管等等。所以，研究和掌握 PN 结的特性具有重要的意义。

PN 结具有单向导电性，这是 PN 结最基本的特性。本实验通过测量正向电流和正向压降的关系，研究 PN 结的正向特性：由可调微电流源输出一个稳定的正向电流，测量不同温度下的 PN 结正向电压值，以此来分析 PN 结正向压降的温度特性。通过这个实验可以测量出玻尔兹曼常数，估算半导体材料的禁带宽度，以及估算通常难以直接测量的极微小的 PN 结反向饱和电流；学习到很多半导体物理的知识，掌握 PN 结温度传感器的原理。

【实验目的】

- 1、测量同一温度下，正向电压随正向电流的变化关系，绘制伏安特性曲线；
- 2、在同一恒定正向电流条件下，测绘 PN 结正向压降随温度的变化曲线，确定其灵敏度，估算被测 PN 结材料的禁带宽度；
- 3、学习指数函数的曲线回归的方法，并计算出玻尔兹曼常数，估算反向饱和电流；
- 4、探究：用给定的 PN 结测量未知温度。

【实验原理】

一、PN 结的正向特性

理想情况下，PN 结的正向电流随正向压降按指数规律变化。其正向电流 I_F 和正向压降 V_F 存在如下近关系式：

$$I_F = I_s \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) \quad (1)$$

其中 q 为电子电荷； k 为玻尔兹曼常数； T 为绝对温度； I_s 为反向饱和电流，它是一个和 PN 结材料的禁带宽度以及温度有关的系数，可以证明：

$$I_s = CT^r \exp\left(-\frac{qV_{g(0)}}{kT}\right) \quad (2)$$

其中 C 是与结面积、掺杂浓度等有关的常数， r 也是常数（ r 的数值取决于少数载流子迁移率对温度的关系，通常取 $r=3.4$ ）； $V_{g(0)}$ 为绝对零度时 PN 结材料的带底和价带顶的电势差，对应的 $qV_{g(0)}$ 即为禁带宽度。

将 (2) 式代入 (1) 式, 两边取对数可得:

$$V_F = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right) T - \frac{kT}{q} \ln T^r = V_1 + V_{n1} \quad (3)$$

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

$$V_{n1} = -\frac{kT}{q} \ln T^r$$

方程 (3) 就是 PN 结正向压降作为电流和温度函数的表达式, 它是 PN 结温度传感器的基本方程。令 $I_F = \text{常数}$, 则正向压降只随温度而变化, 但是在方程 (3) 中还包含非线性项 V_{n1} 。下面来分析一下 V_{n1} 项所引起的非线性误差。

设温度由 T_1 变为 T 时, 正向电压由 V_{F1} 变为 V_F , 由 (3) 式可得

$$V_F = V_{g(0)} - (V_{g(0)} - V_{F1}) \frac{T}{T_1} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_1}\right)^r \quad (4)$$

按理想的线性温度响应, V_F 应取如下形式

$$V_{\text{理想}} = V_{F1} + \frac{\partial V_{F1}}{\partial T} (T - T_1) \quad (5)$$

$\frac{\partial V_{F1}}{\partial T}$ 等于 T_1 温度时的 $\frac{\partial V_F}{\partial T}$ 值

由 (3) 式求导, 并变换可得到

$$\frac{\partial V_{F1}}{\partial T} = -\frac{V_{g(0)} - V_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r \quad (6)$$

$$\text{所以 } V_{\text{理想}} = V_{F1} + \left(-\frac{V_{g(0)} - V_{F1}}{T_1} - \frac{k}{q} r\right) (T - T_1)$$

$$= V_{g(0)} - (V_{g(0)} - V_{F1}) \frac{T}{T_1} - \frac{k}{q} (T - T_1) r \quad (7)$$

由理想线性温度响应 (7) 式和实际响应 (4) 式相比较, 可得实际响应对线性的理论偏差为:

$$\Delta = V_{\text{理想}} - V_F = -\frac{k}{q} (T - T_1) r + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_1}\right)^r \quad (8)$$

设 $T_1 = 300^\circ\text{K}$, $T = 310^\circ\text{K}$, 取 $r = 3.4$, 由 (8) 式可得 $\Delta = 0.048\text{mV}$, 而相应的 V_F 的改变

量约为 20 mV 以上，相比之下误差 Δ 很小。不过当温度变化范围增大时， V_F 温度响应的非线性误差将有所递增，这主要由于 r 因子所致。

综上所述，在恒流小电流的条件下，PN 结的 V_F 对 T 的依赖关系取决于线性项 V_1 ，即正向压降几乎随温度升高而线性下降，这也就是 PN 结测温的理论依据。

二、求 PN 结温度传感器的灵敏度，测量禁带宽度

由前所述，我们可以得到一个测量 PN 结的结电压 V_F 与热力学温度 T 关系的近似关系式：

$$V_F = V_1 = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F}\right)T = V_{g(0)} + ST \quad (9)$$

式中 $S(\text{mV}/^\circ\text{C})$ 为 PN 结温度传感器灵敏度。

用实验的方法测出 V_F - T 变化关系曲线，其斜率 $\Delta V_F / \Delta T$ 即为灵敏度 S 。

在求得 S 后，根据式 (9) 可知

$$V_{g(0)} = V_F - ST \quad (10)$$

从而可求出温度 0K 时半导体材料的近似禁带宽度 $E_{go} = qV_{g(0)}$ 。硅材料的 E_{go} 约为 1.21eV。

必须指出，上述结论仅适用于杂质全部电离，本征激发可以忽略的温度区间（对于通常的硅二极管来说，温度范围约 -50°C - 150°C ）。如果温度低于或高于上述范围时，由于杂质电离因子减小或本征载流子迅速增加， V_F - T 关系将产生新的非线性，这一现象说明 V_F - T 的特性还随 PN 结的材料而异，对于宽带材料（如 GaAs， E_g 为 1.43eV）的 PN 结，其高温端的线性区则宽；而材料杂质电离能小（如 Insb）的 PN 结，则低温端的线性范围宽。对于给定的 PN 结，即使在杂质导电和非本征激发温度范围内，其线性度亦随温度的高低而有所不同，这是非线性项 V_{nl} 引起的，由 V_{nl} 对 T 的二阶导数 $\frac{d^2V}{dT^2} = \frac{1}{T}$ 可知， $\frac{dV_{nl}}{dT}$ 的变化与 T 成反比，所以 V_F - T 的线性度在高温端优于低温端，这是 PN 结温度传感器的普遍规律。此外，由 (4) 式可知，减小 I_F ，可以改善线性度，但并不能从根本上解决问题，目前行之有效的方法大致有两种：

1、利用对管的两个 PN 结（将三极管的基极与集电极短路与发射极组成一个 PN 结），分别在不同电流 I_{F1} 、 I_{F2} 下工作，由此获得两者之差 $(I_{F1}-I_{F2})$ 与温度成线性函数关系，即

$$V_{F1}-V_{F2}=\frac{kT}{q} \ln \frac{I_{F1}}{I_{F2}} \quad (11)$$

本实验所用的 PN 结也是由三极管的 cb 极短路后构成的。尽管还有一定的误差，但与单个 PN 结相比其线性度与精度均有所提高。

2、采用电流函数发生器来消除非线性误差。由（3）式可知，非线性误差来自 T^r 项，利用函数发生器， I_F 比例于绝对温度的 r 次方，则 V_F-T 的线性理论误差为 $\Delta=0$ 。实验结果与理论值比较一致，其精度可达 0.01°C 。

三、求波尔兹曼常数

由式（11）可知，在保持 T 不变的情况下，只要分别在不同电流 I_{F1} 、 I_{F2} 下测得相应的 V_{F1} 、 V_{F2} 就可求得波尔兹曼常数 k 。

$$k = \frac{q}{T} \ln \frac{I_{F2}}{I_{F1}} (V_{F1} - V_{F2}) \quad (12)$$

为了提高测量的精度，也可根据式（1）指数函数的曲线回归，求得 k 值。方法是以公式 $I_F = A \exp(BV_F)$ 的正向电流 I_F 和正向压降 V_F 为变量，根据测得的数据，用 Excel 进行指数函数的曲线回归，求得 A 、 B 值，再由 $A=I_s$ 求出反向饱和电流， $B = q/kT$ 求出波尔兹曼常数 k 。

【实验内容与步骤】

实验前，请参照仪器使用说明，将 DH-SJ 型温度传感器实验装置上的“加热电流”开关置“关”位置，将“风扇电流”开关置“关”位置，接上加热电源线。插好 Pt100 温度传感器和 PN 结温度传感器，两者连接均为直插式。PN 结引出线分别插入 PN 结正向特性综合试验仪上的 +V、-V 和 +I、-I。注意插头的颜色和插孔的位置。

打开电源开关，温度传感器实验装置上将显示出室温 T_R ，记录下起始温度 T_R 。

1、测量同一温度下，正向电压随正向电流的变化关系，绘制伏安特性曲线；

为了获得较为准确的测量结果，我们在仪器通电预热 10 分钟后进行实验。先以室温为基准，测整个伏安特性实验的数据。

首先将 PN 结正向特性综合试验仪上的电流量程置于 $\times 1$ 档，再调整电流调节旋钮，观察对应的 V_F 值应有变化的读数。可以按照表 1 的 V_F 值来调节设定电流值，如果电流表显示值到达 1000，可以改用大一档量程，记录下一系列电压、电流值于表 1。由于采用了高精度的微电流源，这种测量方法可以减小测量误差。

表 1 同一温度下正向电压与正向电流的关系 $T= \quad \quad \quad ^\circ\text{C}$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
V_F/V	0.350	0.360	0.370	0.380	0.390	0.400	0.410	0.420

$I_F/\mu A$								
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
V_F/V	0.430	0.440	0.450	0.460	0.470	0.480	0.490	0.500
$I_F/\mu A$								
序号	17	18	19	20	21	22	23	24
V_F/V	0.510	0.520	0.530	0.540	0.550	0.560	0.570	0.580
$I_F/\mu A$								

注意，在整个实验过程中，都是在室温下测量的。实际的 V_F 值的起、终点和间隔值可根据实际情况微调。

有兴趣的同学也可以再设置一个合适的温度值，待温度稳定后，重复以上实验，测得一组其他温度点的伏安特性曲线。

2、在同一恒定正向电流条件下，测绘 PN 结正向压降随温度的变化曲线，确定其灵敏度，估算被测 PN 结材料的禁带宽度；

选择合适的正向电流 I_F ，并保持不变。一般选小于 $100\mu A$ 的值，以减小自身热效应。将 DH-SJ 型温度传感器实验装置上的“加热电流”开关置“开”位置，根据目标温度，选择合适的加热电流，在实验时间允许的情况下，加热电流可以取得小一点，如 $0.3\sim 0.6A$ 之间。这时加热炉内温度开始升高，开始记录对应的 V_F 和 T 于表 2。为了更准确地记数，可以根据的变化，记录 T 的变化。

注意：在整个实验过程中，正向电流 I_F 应保持恒定。设定的温度不宜过高，必须控制在 $120^\circ C$ 以内。

表 2 同一 I_F 下，正向电压与温度的关系 $I_F =$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$T/^\circ C$								
V_F/V								
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
$T/^\circ C$								
V_F/V								
序号	17	18	19	20	21	22	23	24
$T/^\circ C$								
V_F/V								

μA

3、计算玻尔兹曼常数,学习用 EXECL 进行指数函数的曲线回归的方法。

直接算法：对表 1 测得的数据，用公式 (12)，计算出玻尔兹曼常数 $k =$ _____。

曲线拟合法：借用 Excel 程序拟合指数函数。以公式 $I_F = A \exp(BV_F)$ 的正向电流 I_F

和正向压降 V_F 为变量, 根据表 1 测得的数据, 以 V_F 为 x 轴数据, I_F 为 y 轴数据, 用 Excel 进行指数函数的曲线回归, 求得 A、B 值, 再由 $A=I_s$, 估算出反向饱和电流; $B = q/kT$, 求出波尔兹曼常数 k 。

Excel 中自动拟合曲线的方法:

1) 在 Excel 中将选中需要拟合的正向电压和正向电流数据, 依次点击 Excel 程序菜单插入——图标——标准类型——xy 散点图——子表类型——无数据点平滑散点图——下一步, 出现数据区域、系列选项, 在数据区域选项中, 可根据实际的数据区域的排列, 选择行或列; 在系列选项中可填入不同系列的代号, 如该曲线测量时的温度值; 点击下一步, 出现图标选项, 在标题项中, 可填入图标标题、数值 (X) 轴、数值 (Y) 轴内容, 如 PN 结伏安特性、正向电压 (V)、正向电流 (μA), 在网格线项中, 可选择主要网格线、次要网格线; 点击下一步, 可完成曲线的图表绘制。

完成后的图标, 如果需要更改, 还可以继续设置。双击图标区域, 在弹出的绘图区格式中, 可以选择绘图区的背景色; 双击坐标轴, 在弹出的坐标轴格式框中, 可设置坐标轴的刻度、起始值等, 可根据需要自行设置。

完成以上设置后, 在已产生图表中, 右键单击数据曲线, 在右键菜单中, 选择添加趋势线, 在类型菜单中选择要生成曲线的类型, 这里选择指数 (X), 在选项菜单中选中显示公式、显示 R 平方值点击确定即可显示公式。右键点击公式, 点击数据标志格式, 选择数字栏的科学计数, 小数位数选择 3 位, 点击确定, 即可根据此公式可求出:

$$A = \text{_____}, B = \text{_____}, \text{相关系数 } r = \sqrt{R^2} = \text{_____}。$$

$$\text{估算反向饱和电流 } I_s = A = \text{_____}, \text{波尔兹曼常数 } k = q/(BT) = \text{_____}。$$

4、求被测 PN 结正向压降随温度变化的灵敏度 S (mV/K)。

以 T 为横坐标, V_F 为纵坐标, 作 V_F-T 曲线, 其斜率就是 S 。这里的 T 单位为 K。用 Excel 对 V_F-T 数据按公式 $V_F = AT + B$ 进行直线拟合, 方法同前, 参数可重新设定, 建议 X 轴坐标起始点选 270K。在添加趋势线时, 在类型菜单中选择线性 (L) 即可。根据得到的公式, 可求出:

$$A = \text{_____}, B = \text{_____}, \text{相关系数 } r = \sqrt{R^2} = \text{_____}。$$

(1) 斜率, 即传感器灵敏度 $S = A = \text{_____} \text{ mV/K}$;

(2) 截距 $V_{g(0)} = B = \text{_____} \text{ V (0K 温度)}$;

5、估算被测 PN 结材料的禁带宽度。

1) 由前已知, PN 结正向压降随温度变化曲线的截距 B 就是 V_{g_0} 的值。也可以根据公式 (10) 进行单个数据的估算, 将温度 T 和该温度下的 V_F 代入 $V_{g(0)} = V_F - ST$ 即可

求得 V_{g0} ，注意 T 的单位是 K。

2) 将实验所得的 $E_{g(0)} = qV_{g(0)} = \underline{\hspace{2cm}}$ 电子伏，与公认值 $E_{g(0)} = 1.21$ 电子伏比较，并求其误差。

*6、探究：用给定的 PN 结测量未知温度。

实验使用的 PN 结传感器可以方便地取出。根据实验原理，结合实验仪器，将该 PN 结制成温度传感器，试用其测量未知的温度。具体过程请自行设定。