**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结的特性具有非常重要的意义。

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*IF*和正向压降*VF*存在如下近关系式：

 （1）

其中*q*为电子电荷；*k*为玻尔兹曼常数；*T*为绝对温度；*IS*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：

 （2）

其中*C*是与结面积、掺质浓度等有关的常数，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）；*Vg(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*qVg(0)*即为禁带宽度。

将（2）式代入（1）式，两边取对数可得：



（3）

其中



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*IF*=常数，则正向压降只随温度而变化，但是在方程（3）中还包含非线性顶*Vn1*。下面来分析一下*Vn1*项所引起的非线性误差。

设温度由T1变为T时，正向电压由*VF1*变为*VF*，由（3）式可得

 （4）

按理想的线性温度响应，*VF*应取如下形式

 （5）

等于T1温度时的值

由（3）式求导，并变换可得到

 （6）

所以

= （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:

△=*V理想 -VF* = （8）

设T1=300°K，T=310°K，取r=3.4,由（8）式可得△=0.048mV，而相应的VF的改变量约为20 mV以上，相比之下误差△很小。不过当温度变化范围增大时，*VF*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*VF*对*T*的依赖关系取决于线性项*V1*，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*VF*与热力学温度*T*关系的近似关系式：

 （9）

式中*S*(mV/℃)为PN结温度传感器灵敏度。

用实验的方法测出*VF-T*变化关系曲线，其斜率△*VF*/△*T*即为灵敏度*S*。

在求得*S*后，根据式（9）可知

 （10）

从而可求出温度0K时半导体材料的近似禁带宽度＝。硅材料的约为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℃-150℃）。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，*VF—T*关系将产生新的非线性，这一现象说明*VF—T*的特性还随PN结的材料而异，对于宽带材料（如GaAs，Eg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*Vn1*引起的，由*Vn1*对*T*的二阶导数可知，的变化与*T*成反比，所以*VF—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*IF*，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*IF1、IF2*下工作，由此获得两者之差（*IF1-IF2*）与温度成线性函数关系，即

*VF1-VF2*= （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Tr项，利用函数发生器，*IF*比例于绝对温度的r次方，则*VF—T*的线性理论误差为△=0。实验结果与理论值比较一致，其精度可达0.01℃。

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IF1、IF2下测得相应的VF1、VF2就可求得波尔兹曼常数*k*。

 （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。方法是以公式的正向电流*IF*和正向压降*VF*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=*Is*求出反向饱和电流，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TR，记录下起始温度TR。

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×1档，再调整电流调节旋钮，观察对应的VF值应有变化的读数。可以按照表1的VF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。由于采用了高精确度的微电流源，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= ℃

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 |
| ***IF*/**μ**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 |
| ***IF*/**μ**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 |
| ***IF*/**μ**A** |  |  |  |  |  |  |  |  |

注意，在整个实验过程中，都是在室温下测量的。实际的VF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IF，并保持不变。一般选小于100μA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0.3～0.6A之间。这时加热炉内温度开始升高，开始记录对应的VF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IF应并保持不变。设定的温度不宜过高，必须控制在120℃以内。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ***T*/**℃ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***VF*/V** |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 序号 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| ***T*/**℃ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***VF*/V** |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 序号 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| ***T*/**℃ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***VF*/V** |  |  |  |  |  |  |  |  |

表2 同一IF下，正向电压与温度的关系 IF= 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。

直接计算法：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。以公式的正向电流IF和正向压降*VF*为变量，根据表1测得的数据，以*VF*为x轴数据，*IF*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=*Is*，估算出反向饱和电流；，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= ，B= ，相关系数= 。

估算反向饱和电流Is =A= ，波尔兹曼常数= 。

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，*VF*为纵坐标，作*VF—T*曲线，其斜率就是*S*。这里的T单位为K。用Excel对*VF—T*数据按公式进行直线拟合，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= ，B= ，相关系数= 。

（1）斜率，即传感器灵敏度S＝A=\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_;

（2）截距*Vg(0*) =B=\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_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VF代入即可求得，注意T的单位是K。

2）将实验所得的*Eg(0)=qVg(0)* = 电子伏，与公认值*Eg(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。