

用于超导隧道结测量的程控电压偏置交流电桥

项 伟 平

(中国科学院物理研究所)

我们通过电子隧道效应可以研究超导体的能隙、电子状态密度和声子谱。隧道结电流 I 和电压 V 的特性决定了超导体的能隙，电导 σ ($=dI/dV$) 和 V 的特性与超导体的电子状态密度有关， $d\sigma/dV$ ($=d^2I/dV^2$) 和 V 的特性反应了超导体声子谱的特征。

在参考文献[1—5]中，介绍了几种测量隧道结电流电压特性的电桥电路。这些电路或者加恒定的电流调制信号测量 dV/dI 和 d^2V/dI^2 与 V 的关系，或者加电压调制信号测量 dI/dV 和 d^2I/dV^2 与 V 的关系。加恒压调制信号的电路进而分为直流恒流偏置和直流恒压偏置两种。

我们采用恒压偏置和恒压调制的电桥电路，是因为这种电路不仅可以检查 S_1IS_2 隧道结的负阻区，而且可以直接测量隧道结的 I ， dI/dV ， d^2I/dV^2 与 V 的关系，容易和理论预测值相比较。

一、电路的功能

1. 电桥电路分析

电路的原理如图 1 所示。偏置电压和调制信号通过一个运算放大器加到超导隧道结的两端。图 1 中的前置放大器和锁相放大器用来提取一次谐波信号和二次谐波信号，实现对 dI/dV 和 d^2I/dV^2 的测量。阶梯扫描电压由 APPLEII 微机控制产生。

由于隧道结电阻一般很小，为了消除引线电阻带来的误差，我们采用四端连接方式。我们选用的运算放大器、x-y 记录仪、前置放大器和数字电压表都具有高的输入阻抗，因此，我

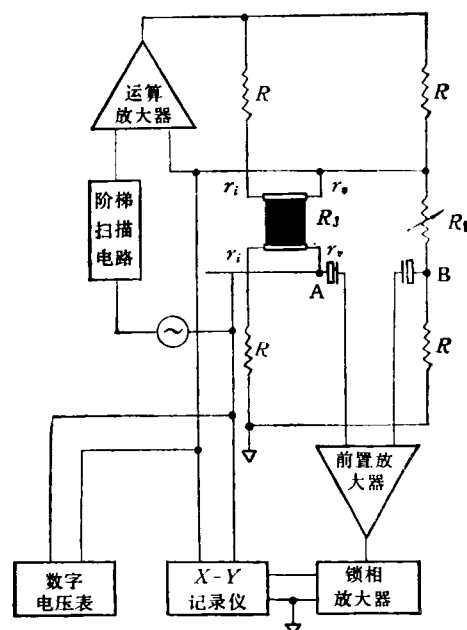


图 1 恒压偏置和恒压调制电桥电路原理图

们在分析电路时可以忽略这些仪器的影响（看成开路）。由于隧道结电阻随偏置电压的变化不明显，我们可以假定在整个偏置电压范围内电桥都工作在接近平衡状态。由此得到电路的输出阻抗为

$$Z_o = 2(R_o + R)/A, \quad (1)$$

其中 R_o 和 A 分别是运算放大器的输出阻抗和开环增益。设隧道结的等效交流电阻为 R_J ，我们求得隧道结两端的调制信号幅度的稳定度为

$$\begin{aligned} \delta v_J/v_{mod} = & (\delta R_J/R_b)[2(R + R_b)R \\ & + (2R + R_b)(2R_o + R)]/ \\ & [2AR_b(R + R_b)]. \quad (2) \end{aligned}$$

加到隧道结两端的电压为 $V_o + V_J \cos \omega t$ (其中 V_o 是直流偏置电压)，故通过隧道结的电流(按泰勒级数展开到二级小量)为

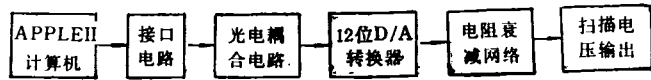


图2 阶梯电压扫描总框图

$$I = I(V_J) + (dI/dV)v_J \cos \omega t + \frac{1}{4} (d^2I/dV^2)v_J^2(1 + \cos 2\omega t). \quad (3)$$

由回路方程及上式求得前置放大器输入端的一次谐波信号和二次谐波信号的幅值为

$$V_{AB}(\omega) = [RR_b/(R + R_b)]v_J(dI/dV - 1/R_b); \quad (4)$$

$$V_{AB}(2\omega) = \frac{1}{4} [RR_b/(R + R_b)]v_J^2 d^2I/dV^2. \quad (5)$$

从输出阻抗和稳定度方面考虑,根据(1)式和(2)式, R 值越小越好;但从信号电平来看,根据(4)式和(5)式, R 值越大越好。为了满足两方面的需要,我们取 $R/R_b = 10$, 一般不超过 100。另外,我们所选用的运算放大器是 OP 37 GP 型号,其开环增益在调制信号频率为 100Hz 时是 3×10^5 。因此,由(2)式知道 v_J 随 R_J 的变化很小。根据(4)式和(5)式,我们可以认为 $V_{AB}(\omega)$ 和 dI/dV 成线性关系, $V_{AB}(2\omega)$ 与 d^2I/dV^2 成正比。我们只需通过锁相放大器测量 $V_{AB}(\omega)$ 和 $V_{AB}(2\omega)$, 即可推断出 dI/dV 和 d^2I/dV^2 , 进而得到它们与偏置电压 V 的关系曲线。

2. 阶梯电压扫描电路原理

我们的偏置电压扫描由微机控制的阶梯电压发生电路提供。电路的总框图如图 2 所示。APPLEII 计算机通过接口电路在 12 位 D/A 转换器的输入端产生等间隔的数字递增,从而在 D/A 转换器输出端产生阶梯电压。为了能得到适合超导隧道结测量的偏置电压范围,我们在 D/A 转换器的输出端接上电阻衰减网络。光电耦合器的作用就是将 APPLEII 计算机的地和模拟地隔离开来,以减低 APPLEII 计算机对模拟电路的干扰。

我们所编程序有以下功能:

- (1) 能产生阶梯波;

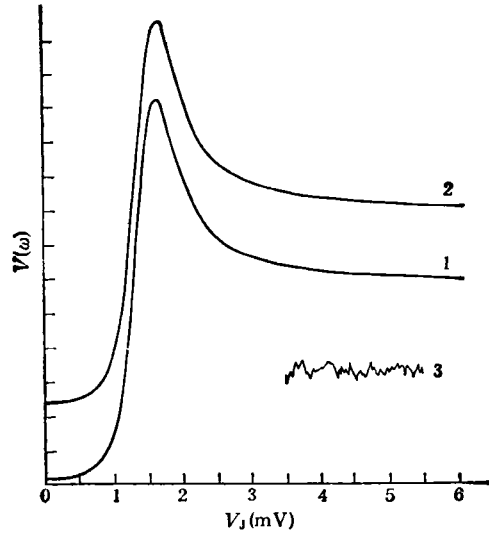


图3 用本装置测得的隧道结 $Nb-A1_2O_3-Al$ 的 $dI/dV-V$ 特性. $T = 1.47K$, $\omega = 2\pi \times 83.2rad/s$, 时间常数: 曲线 1 为 $\tau = 0.3s$, 曲线 2 的 $\tau = 1s$, 锁相灵敏档是 $500 \mu V$, X-Y 记录仪 Y 轴灵敏度是 $0.5V/div$, 曲线 3 是 $v_J = 3 mV$ 时 $V(\omega)$ 随时间的变化 (锁相灵敏档是 $10 \mu V$, $\tau = 0.3s$, X-Y 记录仪 Y 轴灵敏度是 $0.1V/div$), 代表信号电路的噪声

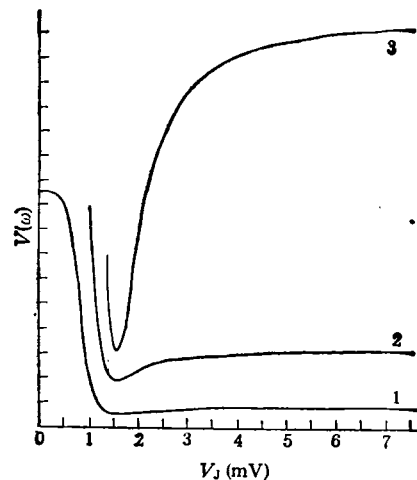


图4 用恒流扫描和恒流调制装置测量的隧道结 $Nb-A1_2O_3-Al$ 的 $dV/dI-V$ 特性

($T = 1.47K$, 调压电压是 $40 \mu V$, $\omega = 2\pi \times 83.8rad/s$, $\tau = 1s$, 曲线 1 和 2 只是 R_b 不同, 曲线 3 不仅 R_b 与曲线 1, 2 不同, 锁相灵敏度也增大一倍)

(下转第 192 页)