

# 非平衡超导体 N-S 分区的实验证明

杨乾声 尹 瀚 刘贵荣 王小玲

(中国科学院物理研究所)

1985 年 4 月 24 日收到

## 提 要

用隧道注入准粒子,使超导铅膜进入非平衡状态,在同样水平的注入条件下,可能出现两种与历史有关的非平衡零电阻状态. 本文用 Pb-Pb-Pb 双重隧道结构,探测这两种非平衡态的性质,发现一种是均匀的非平衡态,另一种是 N-S 分区的非均匀非平衡状态.

## 一、引 言

经隧道结向超导膜注入准粒子,当注入到一定强度时,非平衡超导膜上会出现电阻<sup>[1,2]</sup>. 这种电阻态可能是超导体远离平衡时均匀态变得不稳定,而出现非均匀态的结果. 最近 Dynes<sup>[3]</sup> 和 Gray<sup>[4]</sup> 等人还发现隧道注入到一定强度时,非平衡超导体可能出现二能隙甚至多能隙结构. 以后,人们也把此现象归之为远离平衡时均匀态的不稳定性. 不久前,我们曾用 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pb 单电子隧道结,测量隧道注入下 Pb 膜上的非平衡电压特性

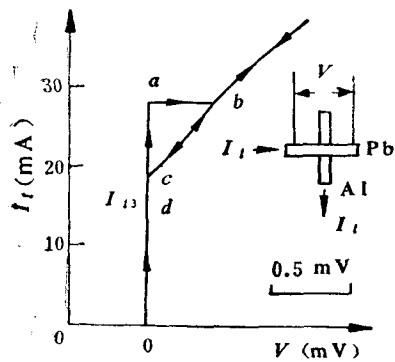


图 1 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pb 单电子隧道结的非平衡电压特性曲线<sup>[2]</sup>  $T = 1.89\text{K}$

$I_t$ - $V$  曲线<sup>[2]</sup>. 在  $T < T_\lambda$  时, 曲线出现滞迴(见图 1), 根据滞迴与历史有关的现象, 发现一个新的阈值电流  $I_{t3}$ . 当注入电流  $I_t > I_{t3}$  时, Pb 膜可以有两种不同的非平衡零电阻态. 并且猜想: 注入电流增加时,  $0 \rightarrow a$  的零电阻态是均匀态; 而注入电流从  $b$  下降, 曲线沿  $b \rightarrow c \rightarrow d$  走,  $c \rightarrow d$  的零电阻态是非均匀态. 本文用 Pb-Pb-Pb 双结结构, 一个作注入结, 使中间 Pb 膜进入非平衡状态, 另一个作探测结, 观察中间非平衡 Pb 膜的非平衡性质. 结果发现两种非平衡零电阻态中的一种是均匀态, 另一种确是 N-S 分区的非均匀的非

平衡零电阻态. 从而在实验上证明了, 远离平衡的超导体的均匀态不稳定, 导致可能是 S-S 分区, 出现多能隙结构; 也可能是 N-S 分区, 其中一种是 N 区形成通路, 出现电阻; 另一种是 S 区形成通路, 表现为非均匀零电阻态.

## 二、实验结果和分析

实验用样品是 S<sub>1</sub>-I-S<sub>2</sub>-I-S<sub>3</sub> 双重单电子隧道结结构 (见图 2), S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> 都是 Pb 膜.

$S_1, S_2$  厚约  $1000 \text{ \AA}$ ,  $S_3$  厚约  $1500 \text{ \AA}$ . 由 Pb 自然氧化产生 PbO 形成绝缘层 I.  $S_1$ -I- $S_2$  作注入结, 隧道注入准粒子使中间 Pb 膜  $S_2$  进入非平衡态.  $S_2$ -I- $S_3$  作探测结, 观察非平衡 Pb 膜的超导性质. 注入结和探测结的隧道特性 (见图 3), 表明两个结都形成质量相当好的位垒.

样品表面直接与液 He 接触,  $T = 4.2 \text{ K}$ , 注入结加隧道电流  $I_i$ , 测中间 Pb 膜  $S_2$  的非平衡电压特性  $I_i$ - $V_2$  (见图 4 中插图), 情况与以前单结实验中观察到的  $T \leq 2\text{K}$  时的 Pb 膜非平衡特性曲线类似, 也有滞迴和出现  $I_{i3}$  阈值点. 对应于不同的注入电流, 测量探测结的隧道特性  $I_d$ - $V_d$  (见图 4). 图 4 中不同字母标号的曲线表示相应于图中插图注入非平衡电压曲线上的相应电流  $I_i$  偏置点. 注入电流从零增加到  $a$  点, 再增到  $b$  点, 膜上出现电压以后, 注入电流下降到  $c$  点.  $a$  和  $c$  点的注入电平几乎一样, 都在  $I_{i3}$  以上, 仅历史状况不同. 注入在  $a$  点的探测结特性基本上与零注入的平衡态隧道特性相同, 只是由于注入使非平衡准粒子数增加, 隧道曲线稍向上移. 而注入在同样水平的  $c$  点, 探测结的隧道曲线发生明显的变化. 当注入电流减小到  $I_{i3}$  以下, 探测结特性又与注入在  $a$  点的特性曲线类似.

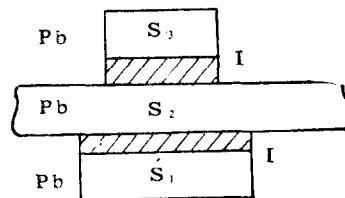


图 2

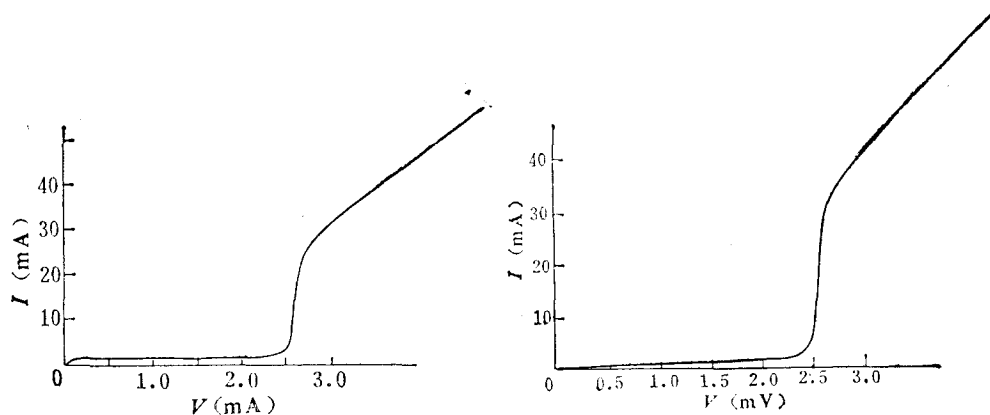


图 3

(a) 注入结  $S_1$ -I- $S_2$  的隧道特性曲线;  $T = 4.2\text{K}$   
 (b) 探测结的  $S_2$ -I- $S_3$  的隧道特性曲线;  $T = 4.2\text{K}$

注入在  $c$  点的探测结隧道曲线有几个特征: (1) 能隙结构的位置基本上不变. (2) 与平衡态的  $I$ - $V$  特性相比, 它沿电流轴有一段位移. 表明在没有电压偏置时, 探测结上已有电流, 这个电流只能是从注入结“漏”过来的. 从注入结和探测结的  $I$ - $V$  特性观察, 两个结都有典型的  $I$ - $V$  曲线, 可以认为位垒本身是好的, “漏电流”是由于中间 Pb 膜出现正常区, 导致注入结与探测结之间的分路造成. 下面将还要较仔细地讨论造成电流分路的原因. (3) 如果去掉电流轴位移的影响, 能隙区以内的  $I_d$ - $V_d$  曲线几乎是一条斜直线, 即  $I_d$  与  $V_d$  是线性的, 这是正常态电子隧道的特征.

根据上面的分析, 我们认为在  $c$  点的探测结隧道特性曲线是由三部分的叠加: 正常

区的电子隧道、超导区的电子隧道以及由于形成正常区,使注入电流有一部分分流到探测结,导致  $I_d-V_d$  曲线在电流轴上位移。

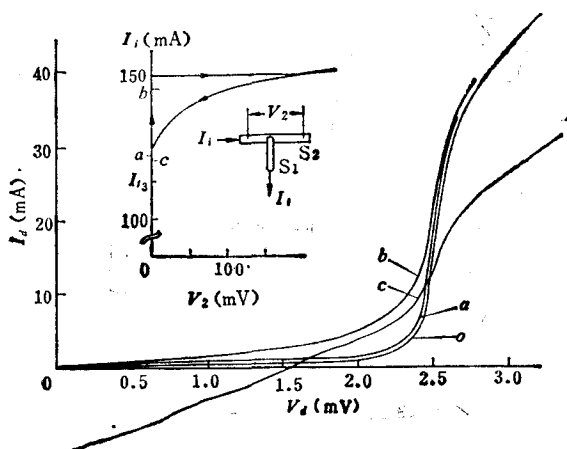


图 4

下面我们给出 N-S 分区的隧道结等效线路,见图 5 (a).  $R_N$  为正常态电子隧道的等效电阻,它是线性元件.  $R_J$  是超导态电子隧道的等效电阻,它是非线性元件. 在能隙区以内  $R_J$  很大,在能隙边上  $R_J$  很小,在大于能隙区,  $R_J$  接近于  $R_N$ . 当电流开始增加,电压  $V < 2\Delta/e$ ,  $R_J$  很大,电流流经  $R_N$ ; 当  $V \sim 2\Delta/e$  时,  $R_J$  很小,电流主要从  $R_J$  流过; 当  $V > 2\Delta/e$  时,  $R_J$  与  $R_N$  同量级,这时  $I-V$  特性与均匀态接近. 图 5 (b) 给出均匀态的  $I-V$  特性与非均匀 N-S 分区的隧道特性. 如果把非均匀态的  $I-V$  特性沿电流轴向下移,就得到图 4 中注入为 c 点的探测结  $I_d-V_d$  曲线.

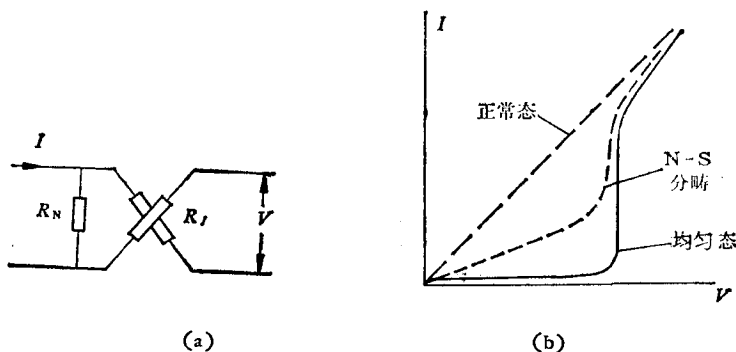


图 5 (a) N-S 分区的电子隧道等效线路; (b) 相应于 (a) 等效线路的 N-S 分畴的  $I-V$  特性曲线,图中还给出正常态电子隧道曲线和均匀超导态电子隧道曲线

### 三、讨 论

1. 中间 Pb 膜出现正常区,将会导致注入电流向探测结分流. 我们假定三层膜处于同样的 N-S 分区的非平衡状态<sup>1)</sup>,为简化起见每层膜的结区由两部分组成,一部分正常态,

1) 在出现非均匀以前,探测结的隧道特性仅在二倍能隙处有结构,表明  $S_2$  和  $S_3$  的能隙是相同的. 另外从 R-T 方程求得

$$\frac{N_{Ph} - N_{PhT}}{\tau_{es}} = \frac{R}{1 + \frac{\tau_{es}}{\tau_B}} (N_{qp}^+ - N_T^+), N_{ph}, N_{qp}$$

分别表示声子和准粒子浓度,  $T$  相应热平衡时的浓度. 这个式子表明,非平衡声子的影响是与相邻膜的非平衡准粒子浓度对应的. 所以我们认为  $S_2$  与  $S_3$  处于同样的非平衡状态.

另一部分超导态。实际上,在非均匀零电阻状态,超导膜是N区为孤岛的N-S分区结构,但下面讨论的定性行为仍适用。这时的等效线路由图6给出。探测结电压 $V_d$ 与注入电流 $I_i$ 以及探测结电流 $I_d$ 有关,

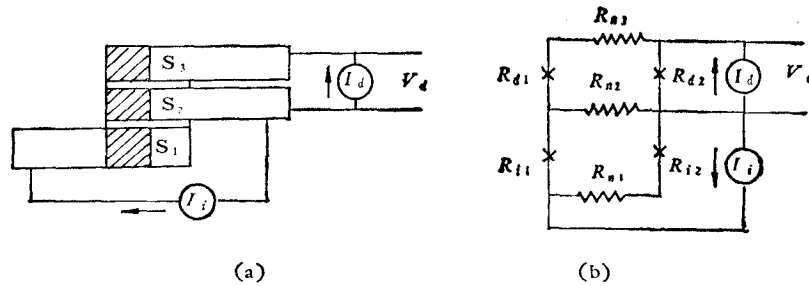


图6 出现 N-S 分区的双重隧道结 (a) 以及它的等效线路 (b)

$$V_d = \frac{(R_i + R_{n1})R_{n2}R_{d2} + (R_i + R_{n1} + R_{n2})(R_{d1} + R_{n3})R_{d2}I_d}{(R_i + R_{n1})R_{n2} + (R_i + R_{n1} + R_{n2})(R_d + R_{n3})} - \frac{R_{n2}(R_{i2} + R_{n1})R_{d2}}{(R_i + R_{n1})R_{n2} + (R_i + R_{n1} + R_{n2})(R_d + R_{n3})} I_i, \quad (1)$$

其中  $R_i = R_{i1} + R_{i2}$ ,  $R_d = R_{d1} + R_{d2}$ .  $R_{d1}$ ,  $R_{i1}$  分别是探测结和注入结正常区隧道结电阻, 它们是与电流无关的常数;  $R_{d2}$  和  $R_{i2}$  分别是探测结和注入结超导区隧道结电阻, 在出现非均匀态时, 注入结偏置一般远大于能隙, 所以可以认为  $R_{i2}$  也是与电流无关的常数.  $R_{n1}$ ,  $R_{n2}$  和  $R_{n3}$  是正常态膜电阻, 也是常数. 不加探测结电流, 即  $I_d = 0$ , 这时有

$$V_d = - \frac{aR_{n2}R_{d2}}{b + cR_{d2}} I_i, \quad (2)$$

$a$ ,  $b$  和  $c$  都是与电流无关的常数. 若中间 Pb 膜无正常区,  $R_{n2} = 0$ , 即使有注入电流, 也应  $V_d = 0$ .  $R_{d2}$  是与探测结电流有关的电阻. 偏置小于能隙时,  $R_{d2}$  很大, 这时由于注入电流  $I_i$  引起的附加探测结电压几乎是恒量, 见 (2) 式; 探测结偏置在能隙值时,  $R_{d2}$  很小, 这时注入电流  $I_i$  对探测结电压影响不大, 所以探测结能隙结构位置基本不变; 探测结偏置大于能隙值,  $R_{d2}$  接近于常数. 所以, 由于中间 Pb 膜出现正常区, 导致探测结隧道特性  $I_d-V_d$  的位移, 而能隙结构位置基本不变.

2. 我们用标准四端引线方法, 测量了 Pb 膜的临界电流, 测出的  $I-V$  曲线也有滞迴. 已经知道这种滞迴是发热造成的. 我们的实验证实, 虽有滞迴但并没有  $I_c$ . 我们也测量了磁场对  $I_c$  的影响<sup>1)</sup>, 证明磁场对  $I_c$  影响不大. 这些实验表明, Pb 膜在准粒子强注入下出现的两种非平衡超导零电阻态, 其中一种是 N-S 分畴的非均匀的非平衡态, 它们不是由于发热或是磁通冻结产生的, 而是在远离平衡时均匀态变得不稳定而导致的本征的非平衡态. 并且进一步明确了, 以前我们所观察到的  $I_c$  阈值点, 就是区分均匀态和 N-S 分区的非均匀态的阈值点.

3. 在单结实验中<sup>2)</sup>, 仅在  $T < T_\lambda$  时, 非平衡电压特性曲线才出现滞迴和  $I_c$  阈值点

1) 陈莺飞、杨乾声、尹渤、刘贵荣, 1985年5月全国低温物性会议上的报告.

而本文中所用的双重隧道样品,在 4.2 K 时,注入结的非平衡电压特性曲线就出现滞迴和  $I_c$  阈值点。两者的差别是双重隧道样品的中间 Pb 膜在结区部分不与液 He 接触,这有可能使样品的声耦合条件与单结情况不同。

洪朝生教授和陈莺飞、陶宏杰同志对本文提了许多有益的意见,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] I. Iguchi, *Phys. Rev.*, B16 (1977), 1954.
- [2] 陈莺飞、杨乾声、陶宏杰、王昌衡、刘贵荣、邵立勤, *低温物理*, 3(1981), 31; *Chinese Physics*, 2 (1982), 499.
- [3] R. C. Dynes, V. Narayanamurti and J. P. Garno, *Phys. Rev. Lett.*, 39(1977), 229.
- [4] K. E. Gray and H. W. Willemsen, *J. Low Temp. Phys.*, 31 (1978), 911.

## EXPERIMENTAL EVIDENCE OF N-S STATE OF NON-EQUILIBRIUM SUPERCONDUCTOR

YANG QIAN-SHENG   YIN BO   LIU GUI-RONG   WANG XIAO-LIN  
(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

Superconducting lead film is driven into the non-equilibrium state by tunnel injection of quasi-particles. There are two kinds of zero resistance state under the same injection level, depending upon the sample history. With the help of double tunnel injection, we found one of them is in the homogeneous non-equilibrium superconducting state and the other in the N-S inhomogeneous one.