第 29 卷 第 12 期
1980 年 12 月

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 29, No. 12
Dec., 1980

研究简报

非平衡情况 Josephson 电流的 Harris 奇点

茅德强 顾一鸣 周子舫 吴杭生
(中国科学技术大学)

1980 年 4 月 4 日收到

提 要

本文用 OS 模型研究了当组成 Josephson 隧道结的一个超导膜处于非平衡态时，Josephson 电流的 Harris 奇点的变化.

一

长期以来，弱连结超导体的隧道电流一直是一个令人感兴趣的课题. 计算表明，通过结的电流为三项之和[3]，

$$I = I_{J1}\sin\varphi + I_{J2}\cos\varphi + I_{qp}, \tag{1}$$

式中正弦项的振幅 I_{J1} 与电压 V 的曲线中存在两个奇点：一是在 $eV = |\Delta_2(T)+\Delta_1(T)|$ 处的 Rieded 型[4]奇点，一是在 $eV = |\Delta_2(T) - \Delta_1(T)|$ 处的 Harris 型奇点，在这 Harris 型奇点处 I_{J1} 值发生了不连续的跃变[5].

本文讨论了组成隧道结的一个膜处于非平衡态，另一个膜处于平衡态时，Harris 奇点的变化.

二

当我们用激光，超声辐照超导膜时，它就要离开平衡态. 设辐照是均匀地照射在组成隧道结的一个膜上，考虑到准粒子扩散长度较长，过量准粒子在体内分布是均匀的；又考虑到隧道的穿透几率较小，所以我们合理地假设被辐照的膜处于非平衡态而另一个膜仍在平衡态[1].

我们用 Owen-Scalapino 提出的 μ^* 模型[2]来讨论. 根据此模型，体系的准粒子分布可用下式描写：

$$f_{ks} = [1 + \exp\beta(E_k - \mu)]^{-1}, \tag{2}$$

式中 $\beta = 1/kT$，μ 为准粒子化学势；又

$$E = \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2},$$

1) 文献[1]中也作了类似假设.

而 $\Delta = \Delta(T, \mu)$ 是温度为 T、化学势为 μ 时非平衡超导体的能隙. 体系离开平衡态的程度，可用约化的过剩准粒子密度来描写：

$$n = \frac{1}{4N(0)\Delta_0}[N_q(\mu) - N_q(0)]$$
$$= \frac{1}{\Delta_0}\int_0^\infty \left[\frac{1}{1+\exp\beta(E-\mu)} - \frac{1}{1+\exp\beta E}\right] de. \tag{3}$$

(3)式中 $\Delta_0 = \Delta(0, 0)$ 为 $T = 0\mathrm{K}$, $\mu = 0$ 时超导体的能隙.

从 OS 模型出发，利用 u-v 变换，可以证明

$$RI_{J1} = \frac{\Delta_1\Delta_2}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\theta(|E_k-\Delta_1|)}{\sqrt{E_k^2-\Delta_1^2}}\frac{\theta(\Delta_2-|E_k+V|)}{\sqrt{\Delta_2^2-(E_k+V)^2}}\,\mathrm{th}\frac{\beta|E_k|}{2}\,dE_k$$
$$-\frac{\Delta_1\Delta_2}{2}\int_{\Delta_2}^{\infty}\frac{dE_g}{\sqrt{E_g^2-\Delta_2^2}}\frac{\theta(\Delta_1-|E_g+V|)}{\sqrt{\Delta_1^2-(E_g+V)^2}}$$
$$\cdot[f(E_g-\mu)-f(-E_g+\mu)]$$
$$-\frac{\Delta_1\Delta_2}{2}\int_{\Delta_2}^{\infty}\frac{dE_g}{\sqrt{E_g^2-\Delta_2^2}}\frac{\theta(\Delta_1-|E_g-V|)}{\sqrt{\Delta_1^2-(E_g-V)^2}}$$
$$\cdot[f(E_g-\mu)-f(-E_g+\mu)]. \tag{4}$$

(4)式中 $f(E-\mu)$ 为 Fermi 分布函数，

$$f(E-\mu) = [1+\exp\beta(E-\mu)]^{-1}, \tag{5}$$

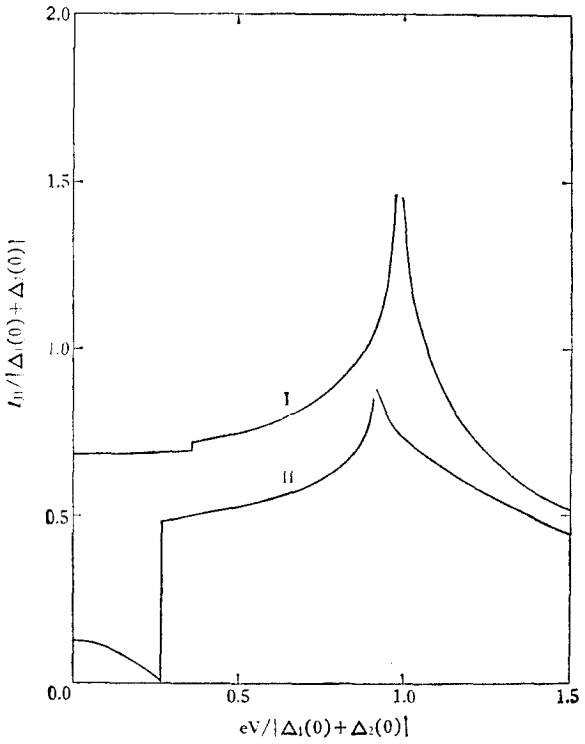

图 1

曲线 I——$T/T_c = 0.5$, $\Delta_1/\Delta_2 = 0.5$, $n = 0.0$;
曲线 II——$T/T_c = 0.5$, $\Delta_1/\Delta_2 = 0.5$, $n = 0.0548$

Δ_1, Δ_2 分别是第一个膜和第二个膜的能隙; R 是正常态的结电阻; $\theta(x)$ 是阶梯函数

$$\theta(x)=\begin{cases}1 & x>0,\\ 0 & x<0.\end{cases}$$

很明显,如 $\mu=0$, 则上式回到了文献[3]的(22)式. 从(4)式出发,我们取定了温度 T, 过剩准粒子密度 n 和 $T=0$K、$n=0$ 时两能隙之比 $\Delta_2(0)/\Delta_1(0)$,就可以用数值计算,求出该条件下 I_{J1}-V 曲线.

计算结果表明,当外加激发施于能隙较大的超导体时,其 Harris 奇点处电流的跃变 $\Delta I_{J1}(n)$ 和平衡结的跃变 $\Delta I_{J1}(0)$ 相比有明显的增加. 图 1 中的曲线 II 就是一条典型的非平衡结的 I_{J1}-V 曲线. 为了比较, 图 1 中的曲线 I 为平衡结的 I_{J1}-V 曲线, 从图 1 上可看到此时的 $\Delta I_{J1}(n)$ 比 $\Delta I_{J1}(0)$ 增加了十几倍. 随着 ΔI_{J1} 的增加, 在 $0<\mathrm{eV}<|\Delta_1(T,\mu)-\Delta_2(T,0)|$ 一段的 I_{J1} 值有显著的减小.

相反,如外加激发施于能隙较小的超导体, 则其 Harris 奇点的电流跃变 $\Delta I_{J1}(n)$ 基本上和平衡结的跃变 $\Delta I_{J1}(0)$ 相同. 图 2 中的曲线 II 为这种情况的 I_{J1}-V 曲线, 为了和图 1 中的曲线 II 比较,两者参数取得十分相近. 由图 2 可见, 它和平衡结的 I_{J1}-V 曲线(图 2 中的曲线 I) 差别很小.

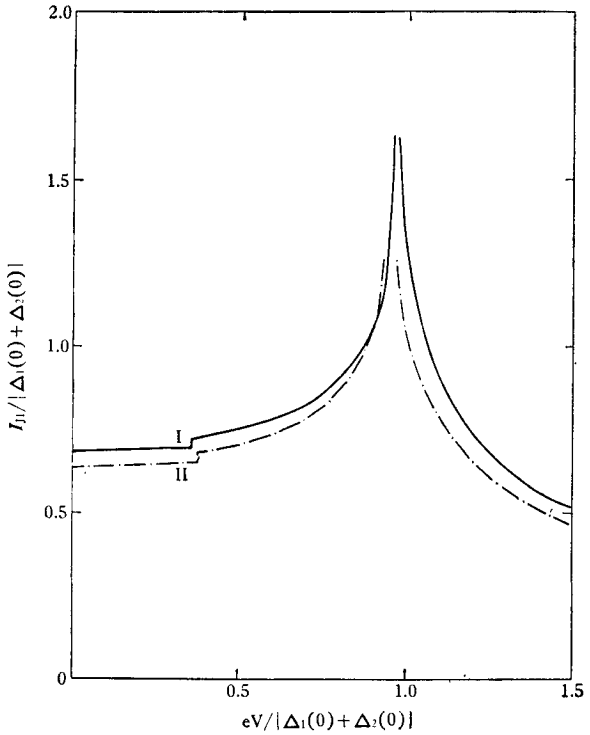

图 2

曲线 I——$T/T_c=0.5$、$\Delta_1/\Delta_2=2.0$, $n=0.0$;
曲线 II——$T/T_c=0.5$, $\Delta_1/\Delta_2=2.0$, $n=0.0419$

图 3 画出了当能隙较大的超导体处于非平衡态时,其 Harris 奇点的电流跃变 $\Delta I_{J1}(n)$ 和过剩准粒子密度 n 的关系. 可看到在 n 较小时, $\Delta I_{J1}(n)$ 随 n 的增加而增加, 达到极

值后，随 n 增加而减小. 作为比较，我们也画出了能隙较小的超导体处于非平衡时的 $\Delta I_{J1}(n)$-n 曲线，它几乎为一直线.

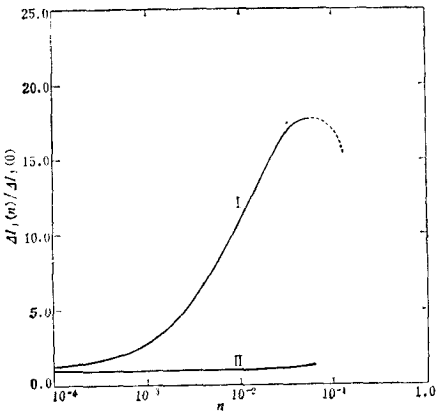

图 3

曲线 I——$T/T_{c1}=0.5$，$\Delta_1/\Delta_2=0.5$；
曲线 II——$T/T_{c1}=0.5$，$\Delta_1/\Delta_2=2.0$

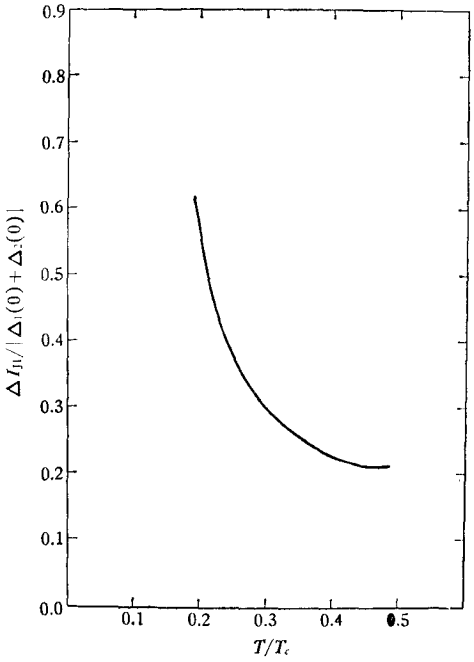

图 4

$n=0.02$；$\Delta_1/\Delta_2=0.5$

图 4 是 n 一定时，ΔI_{J1} 和 T/T_c 的关系，可看到 ΔI_{J1} 随 T/T_c 的减少而增加.

以上结果表明，在一定情况下，过量准粒子的存在对 Harris 奇点起着显著的影响，这样就提供了一种可能，通过测量 Harris 奇点来检验体系离开平衡态的程度. 关于这个问题我们将在另文中讨论.

参　考　文　献

[1] W. H. Parker and W. D. Williams, *Phys. Rev. Letters*, **29**(1972), 924.
[2] C. S. Owen and D. J. Scalapino, *Phys. Rev. Letters*, **28**(1972), 1559.
[3] А. И. Ларкин, Ю. Н. Овчинников, *Жэтф*, **51** (1966), 1535.
[4] E. Riedel, *Z. Naturforsch*, **19a**(1964), 1634.
[5] R. E. Harris, *Phys. Rev.*, **B10**(1974), 84.

THE HARRIS SINGULARITY OF THE JOSEPHSON CURRENT OF A JUNCTION DRIVEN INTO NON-EQUILIBRIUM

MAO DE-QIANG　GU YI-MING
ZHOU ZI-FAN　WU HANG-SHENG
(University of Science and Technology of China)

ABSTRACT

Based on the OS model, the Harris singularity of the Josephson current of a junction which is driven into non-equilibrium, is investigated.