

正常金属/自旋三重态 p 波超导体 结隧道谱的奇异性

李晓薇[†] 刘淑静

(淮阴师范学院物理系, 淮安 223001)

(2005 年 5 月 17 日收到 2005 年 7 月 4 日收到修改稿)

利用 Blonder, Tinkham 和 Klapwijk 理论计算了正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结的隧道谱和平均电流. 计算结果表明: 在自旋三重态 p 波超导结的隧道谱中存在零偏压电导峰、零偏压电导凹陷和双凹陷结构, 并有微分电导随偏压震荡的现象出现. 在 $I-V$ 曲线上出现电流台阶. 这些结果在理论上支持 Sr_2RuO_4 的超导态是自旋三重态 p 波超导态.

关键词: 自旋三重态超导体, p 波超导体, 隧道谱

PACC: 7450, 7210

1. 引 言

在超导机制的研究中, 隧道谱是一很有用的工具. 通过测量正常金属/超导体结的隧道谱, 能获得有关超导配对机制和能隙的信息. 理论研究表明: 非传统的各向异性 d 波超导体由于其表面存在中间束缚态, 导致在零偏压处出现电导峰^[1-4]. 很多高温氧化物超导体, 在测量其隧道谱中能观察到零偏压电导峰. 零偏压电导峰的出现对正常金属/d 波超导体结的隧道谱产生影响^[5, 6]. 非传统的各向异性 d 波超导体和传统的各向同性 s 波超导体一样是自旋单态的.

近几年来, 人们对超导体 Sr_2RuO_4 的研究产生极大的兴趣^[7-10]. 超导体 Sr_2RuO_4 的结构类似于 $(La, Sr)_2CuO_4$ 的结构, 但它没有铜原子的钙钛矿结构, 很多理论和实验工作都支持 Sr_2RuO_4 超导态是自旋三重态的 p 波超导态. 非传统的各向异性超导体的表面存在着中间束缚态, 因而自旋三重态的 p 波超导结在零偏压处也应出现电导峰. 实验上已观察到超导体 Sr_2RuO_4 结的隧道谱有零偏压电导峰^[9], 同时还观察到零偏压电导凹陷和双凹陷结构^[10].

本文利用 Blonder, Tinkham 和 Klapwijk (BTK) 理论^[11]系统地研究正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三

重态的 p 波超导体结 (N/I/N/p) 的隧道谱和平均电流. 计算结果表明: 在 N/I/N/p 结的隧道谱中存在零偏压电导峰、零偏压电导凹陷和双凹陷结构, 另外有量子震荡现象出现. 期望本文的一些结果能为进一步辨别超导体 Sr_2RuO_4 的配对态有所帮助.

2. 准粒子输运系数的计算

在正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结中, 其构形如图 1 所示. $x < -L$ 为正常金属, $x = -L$ 处是绝缘层, $-L < x < 0$ 为正常金属, $x > 0$ 为 p 波超导体. 系统的配对势可表示为

$$\hat{\Delta}(\theta, x) = \hat{\Delta}(\theta)\Theta(x), \quad (1)$$

这里 $\Theta(x)$ 是阶跃函数, $\hat{\Delta}(\theta)$ 为

$$\hat{\Delta}(\theta) = \begin{pmatrix} \Delta_{\uparrow\uparrow}(\theta) & \Delta_{\uparrow\downarrow}(\theta) \\ \Delta_{\downarrow\uparrow}(\theta) & \Delta_{\downarrow\downarrow}(\theta) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

对于自旋三重态的 p 波超导体, 其配对势可表示为^[12]

$$\Delta_{\downarrow\downarrow}(\theta) = \Delta_{\downarrow\uparrow}(\theta) = \Delta_0 f(\theta), \quad (3)$$

$$\Delta_{\uparrow\uparrow}(\theta) = \Delta_{\uparrow\downarrow}(\theta) = 0, \quad (4)$$

式中 θ 是准粒子运动方向与 x 轴的夹角, Δ_0 是 p 波超导体的最大配对势, 并有

[†] 通讯联系人. E-mail: lxw@hytc.edu.cn

$$f(\theta) = \begin{cases} \cos\theta, & p_x \text{ 对称} \\ \sin\theta, & p_y \text{ 对称} \\ e^{i\theta}, & p_x + ip_y \text{ 对称} \end{cases} \quad (5)$$

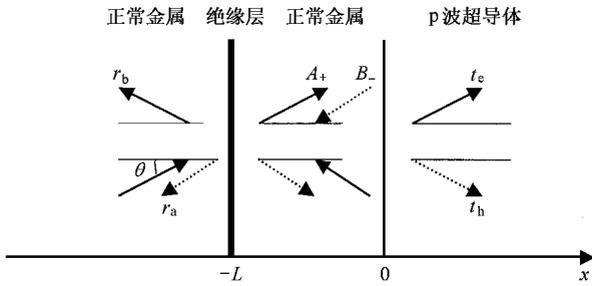


图 1 NIN/p 结中准粒子传播示意图

采用 Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程来研究正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结中的准粒子输运过程, 当不考虑准粒子的自旋反转效应时, 四分量的 BdG 方程分解为两个两分量的 BdG 方程: 一个对应于自旋方向向上的电子、自旋方向向下的空穴 ($u_{\uparrow}, v_{\downarrow}$), 另一个对应于自旋方向向下的电子、自旋方向向上的空穴 ($u_{\downarrow}, v_{\uparrow}$). 对应于 ($u_{\uparrow}, v_{\downarrow}$) 的 BdG 方程^[2,13] 为

$$\begin{pmatrix} H_0 & \Delta_{\uparrow\downarrow} \\ \Delta_{\uparrow\downarrow}^* & -H_0^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\uparrow} \\ v_{\downarrow} \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} u_{\uparrow} \\ v_{\downarrow} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

这里, E 是准粒子相对于费米能的激发能, $H_0 = p^2/2m + V(x) - E_F$ 是准粒子的 Hamiltonian 量, E_F 是准粒子的费米能量, $V(x) = V_0\delta(x+L)$ 是结中绝缘层的势垒散射势.

由 BdG 方程, 我们可以得到在正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结中电子型准粒子从左向右运动的波函数为

在 $x < -L$ 处

$$\Psi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{iq_+ x \cos\theta} + r_a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{iq_- x \cos\theta} + r_b \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-iq_+ x \cos\theta}, \quad (7a)$$

在 $-L < x < 0$ 处

$$\Psi_2 = A_+ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{iq_+ x \cos\theta} + A_- \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-iq_+ x \cos\theta} + B_+ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{iq_- x \cos\theta} + B_- \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{-iq_- x \cos\theta} \quad (7b)$$

在 $x > 0$ 处

$$\Psi_3 = t_e \begin{pmatrix} u_+ e^{i\phi_+} \\ v_+ \end{pmatrix} e^{ik_+ x \cos\theta}$$

$$+ t_h \begin{pmatrix} v_- e^{i\phi_-} \\ u_- \end{pmatrix} e^{-ik_- x \cos\theta}, \quad (7c)$$

式中 r_a, r_b, t_e 和 t_h 分别是入射电子在绝缘层交界面的 Andreev 反射波幅^[14]、电子的反射波幅以及透射到 p 波超导体中的电子和空穴透射波幅, $A_{+(-)}, B_{+(-)}$ 分别是中间正常金属中的电子和空穴透射、反射波幅. $q_{\pm} = \sqrt{k_F^2 \pm 2mE/\hbar}$ 是正常金属中电子和空穴的传播波矢值. $k_{\pm} = [k_F^2 \pm \sqrt{E^2 - |\Delta_{\pm}|^2}]^{1/2}$ 为 p 波超导体中电子和空穴的传播波矢值, k_F 是正常金属和 p 波超导体中费米波矢值. 对于 p 波超导体中透射电子和透射空穴的配对势是不同的, 分别为 $\Delta_+ = \Delta_0 f(\theta)$ 和 $\Delta_- = \Delta_0 f(\pi - \theta)$. $\langle u_{\pm} | \hat{y} = 1 - (v_{\pm} | \hat{y} = (1 + \sqrt{1 - |\Delta_{\pm}|/E|^2})/2$. ϕ_{\pm} 是 p 波超导体的相位, 并有 $e^{i\phi_{\pm}} = \frac{\Delta_{\pm}}{|\Delta_{\pm}|}$.

波函数应满足的边界条件^[11]为

$$\Psi_1(x = -L) = \Psi_2(x = -L), \quad (8a)$$

$$\left(\frac{d\Psi_2}{dx} \right)_{x=-L} - \left(\frac{d\Psi_1}{dx} \right)_{x=-L} = \frac{2mU}{\hbar^2} \Psi_2(x = -L) \quad (8b)$$

和

$$\psi_2(x = 0) = \psi_3(x = 0), \quad (9a)$$

$$\left(\frac{d\psi_2}{dx} \right)_{x=0} = \left(\frac{d\psi_3}{dx} \right)_{x=0}. \quad (9b)$$

把 (7) 式代入 (8) (9) 式, 可以求得

$$r_a = \frac{v_+ e^{-i\phi}}{u_+ (1 + z^2) \eta}, \quad (10a)$$

$$r_b = \frac{-iz e^{-2iq_+ L}}{(1 + iz) \eta} \left\{ 1 - \frac{v_+ v_-}{u_+ u_-} e^{[i\phi_- - \phi_+ + \chi(q_- - q_+)L]} \right\} \quad (10b)$$

$$\eta = 1 - \frac{z^2 v_+ v_-}{(1 + z^2) u_+ u_-} e^{[i\phi_- - \phi_+ + \chi(q_- - q_+)L]},$$

式中 $z = mV_0/(\hbar^2 k_F \cos\theta)$, z 是无量纲的实数, z 表示绝缘层的结界面势垒散射强度, 在上面的计算中已作近似: $k_{\pm} = k_F$, 另取 $q_{\pm} = k_F \pm mE/\hbar k_F$, 从 (10a) 式可以看出绝缘层结界面势垒散射对 Andreev 反射有抑制作用.

3. 微分电导和平均电流的计算

根据 BTK 理论, 可以求得 $T = 0K$ 时正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结的微

分电导为^[11]

$$\begin{aligned} \alpha(eV) = G_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta d\theta \int_{-\infty}^{\infty} dE \\ \times [1 + R_a - R_b] \delta(E - eV), \quad (11) \end{aligned}$$

式中 $R_a = |r_a|^2$, $R_b = |r_b|^2$, e 是电子的电荷量, V 是超导体结的两侧电压. 通过结的平均电流为

$$I = \frac{1}{e} \int_0^{eV} \alpha(E) dE. \quad (12)$$

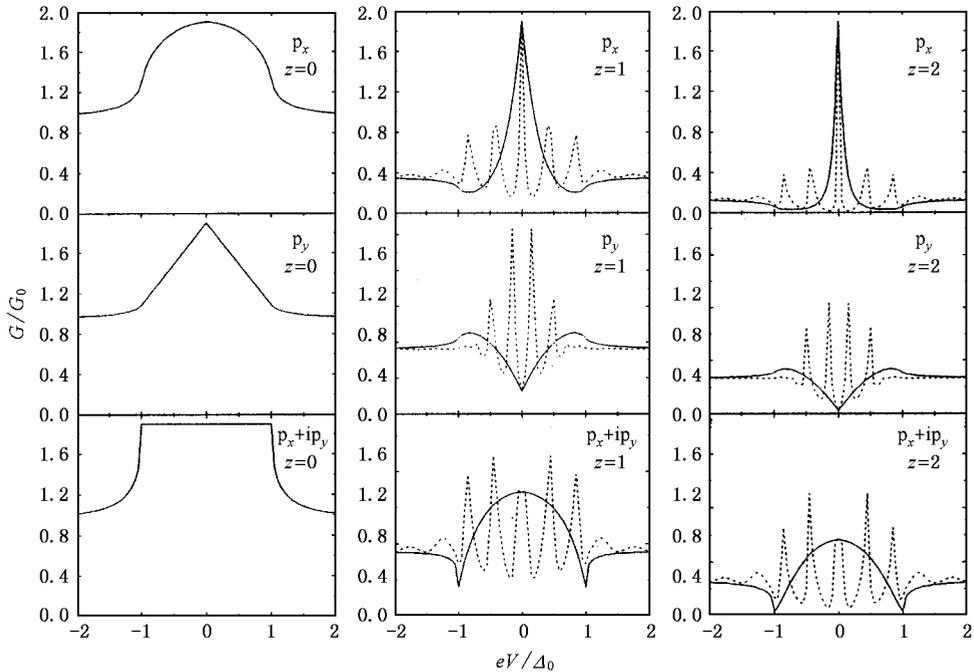


图 2 微分电导 G 随偏压 V 的变化曲线 实线 $L=0$, 虚线 $L/\xi_0=6$

首先, 将 (10) 式代入 (11) 式, 可作出在选取不同参数下正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结 (p 波分别选 p_x , p_y 和 $p_x + ip_y$, 对称) 微分电导随偏压 V 的变化关系曲线 ($E = eV$). 在图 2 中, p_x 波结在零偏压处有电导峰存在, 它和 d 波超导体类似, 这一现象是因为在 p_x 波超导体中有零能束缚态形成, 零偏压电导峰没有随着绝缘层的界面势垒散射强度的增大而变化. p_y 波结在绝缘层的界面势垒散射强度为零时零偏压处有电导峰存在, 随着 z 的增加, 零偏压电导峰劈裂为两个子峰, 出现零偏压电导凹陷现象. $p_x + ip_y$ 波结随着 z 的增加, 微分电导值降低并出现双凹陷结构. $N/I/N/P$ 结隧道谱的这些特性和实验中得到的 Sr_2RuO_4 超导结隧道谱的特性是一致的, 进一步支持 Sr_2RuO_4 超导态是自旋三重态的 p 波超导态的理论. 随着结中间正常金属厚度 L 的增加 (图中虚线取 $L = 6\xi_0$, 这里 $\xi_0 = \hbar v_F / 2\Delta_0$ 是超导体的相干长度^{[15])}, p_x , p_y 和 $p_x + ip_y$ 波结均出现微分电导随偏压震荡的现象, 零偏压处电导值与中间正常金属厚度 L 无关.

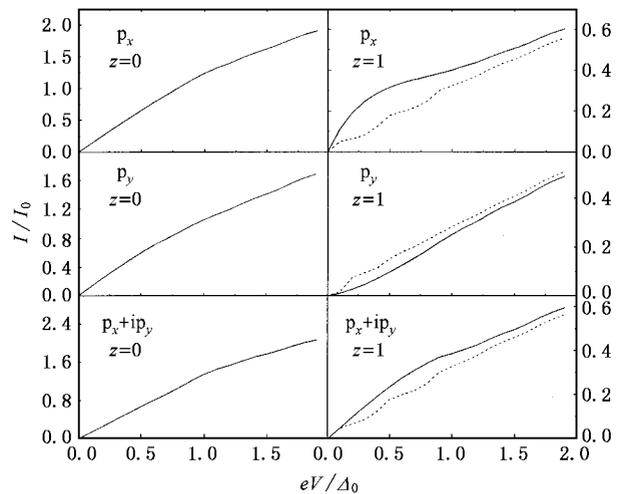


图 3 平均电流 I 随偏压 V 的变化曲线 实线 $L=0$, 虚线 $L/\xi_0=6$, $I_0 = \Delta_0 G_0 / e$

同样, 将 (10) 式代入 (12) 式, 可作出在选取不同参数下正常金属/绝缘层/正常金属/自旋三重态的 p 波超导体结中平均电流随偏压 V 的变化关系曲线 ($E = eV$). 如图 3 所示, 结中平均电流随偏压 V 增大而增大, 随着绝缘层的界面势垒散射强度的增强,

Andreev 反射被抑制, 结中平均电流降低. 随着中间正常金属厚度 L 的增加, p_x , p_y 和 $p_x + ip_y$ 波结中电流出现台阶. 这一现象和 d 波结中相似^[16], 另外 p_x 和 $p_x + ip_y$ 波结中平均电流降低, 而 p_y 波结中平均电流有所升高.

4. 结 语

本文利用 BTK 理论计算了正常金属/绝缘层/正

常金属/自旋三重态的 p 波超导体结中的微分电导和平均电流, 分别讨论了绝缘层的结界面势垒散射强度和中间正常金属厚度 L 对 p_x , p_y 和 $p_x + ip_y$ 波结隧道谱和平均电流的影响. 研究表明: 在 N/I/N/p 结的隧道谱中存在零偏压电导峰、零偏压电导凹陷和双凹陷结构, 有量子震荡现象出现, I - V 曲线中出现电流台阶. 所得结果能定性地解释目前的一些实验现象^[7,10].

-
- [1] Hu C R 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 1526
- [2] Kashiwaya S, Tanaka Y 2000 *Rep. Prog. Phys.* **63** 1641
- [3] Dong Z C 1999 *Acta. Phys. Sin.* **48** 926 (in Chinese) [董正超 1999 物理学报 **48** 926]
- [4] Li X W 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 1367 (in Chinese) [李晓薇 2001 物理学报 **50** 1367]
- [5] Covington M, Aprili M, Parsoanu E, Greene L H, Xu F, Zhu J, Mirkin C A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 277
- [6] Fogelström M, Rainer D, Sauls J 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 281
- [7] Baskaran G 1996 *Physica B* **224** 490
- [8] Mackenzie A P, Maeno Y 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 657
- [9] Mao Z Q, Nelson K D, Jin R, Liu Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 037003
- [10] Laube F, Goll G, Löhneysen H V, Fogelström M, Lichtenberg F 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1595
- [11] Blonder G E, Tinkham M, Klapwijk T M 1982 *Phys. Rev. B* **25** 4515
- [12] Hirai T, Tanaka Y, Yoshida N, Asano Y, Inoue J, Kashiwaya S 2003 *Phys. Rev. B* **67** 174501
- [13] de Gennes P G 1966 *Superconductivity of Metals and Alloys* (New York : Benjamin)
- [14] Andreev A F 1964 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **46** 1823
- [15] Zhu J X, Ting C S 1999 *Phys. Rev. B* **59** R14165
- [16] Xu J H, Miller J H Jr, Ting C S 1996 *Phys. Rev. B* **53** 3604

Tunneling conductance anomalies in normal metal /triplet superconductor junction

Li Xiao-Wei[†] Liu Shu-Jing

(*Department of Physics , Huaiyin Normal College , Huaian 223001 , China*)

(Received 17 May 2005 ; revised manuscript received 4 July 2005)

Abstract

In the framework of the Blonder-Tinkham-Klapwijk model ,we calculate the differential tunneling conductance in normal metal / insulator / normal metal/triplet p-wave superconductor junctions which is studied theoretically as a function of the bias voltage. The results show that there are zero-bias conductance peak , zero-bias conductance dip , double-minimum structures and oscillation components of the differential conductance in the spectra for p-wave superconductor junctions. It can be seen that additional current steps appear in the I - V relationship. The existence of such structures in the conductance spectrum may serve as an evidence that the pairing of Sr_2RuO_4 has p-wave symmetry.

Keywords : triplet superconductor , p-wave superconductor , tunneling conductance

PACC : 7450 , 7210

[†] Corresponding author. E-mail lxw@hytc.edu.cn