

高温超导体霍尔电阻和霍尔角在涡旋玻璃相变附近的普适标度律及统一霍尔电阻方程*

贺 丽 胡 翔 尹 澜 许恒毅 徐晓林 郭建栋 李传义 尹道乐†

(北京大学物理学院人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

(2007 年 5 月 8 日收到, 2008 年 6 月 18 日收到修改稿)

发现了一个钉扎效应影响霍尔电阻 ρ_{xy} 和霍尔角 θ_H 的普适标度律. 同时根据纵向电阻 ρ_{xx} 的扩展幂律形式和对霍尔电导 σ_{xy} 的微观分析, 给出了一个对有一次或多次霍尔反号的高温超导体都适用的霍尔电阻方程.

关键词: 高温超导体, 涡旋玻璃相变, 普适标度律, 霍尔电阻方程

PACC: 6460, 7430F, 7460E

1. 引 言

高温超导体中超流电子涡旋运动的一个非常令人困惑并充满争议的现象就是霍尔电阻反号. 实验上, 在大部分高温超导体和一些传统超导体^[1,2]中发现了超导态霍尔电阻的一次反号, 二次反号甚至三次反号. 另外一个令人困惑的问题是霍尔电阻率 ρ_{xy} 和纵向电阻率 ρ_{xx} 之间的幂律标度关系^[3,4]. 实验显示霍尔效应至少依赖于两个因素: 掺杂状况^[5]和磁通钉扎^[3,4,6]. Vinokur, Geshkenbein, Feigel'man 和 Blattef (VGFB) 计算了磁通钉扎对霍尔电阻的影响, 发现 $\rho_{xy} \propto \rho_{xx}^\beta$, 当霍尔角 θ_H 比较小时 $\beta = 2$ ^[7]. 但是, 实验表明标度指数 β 并不是普适的, 它可以从 $\beta \approx 2$ 变化到 $\beta \approx 1$, 随着外磁场和缺陷的不同而变^[4]. 基于对钉扎势的一个简单的模型, Kopnin 和 Vinokur 指出, 随着钉扎的增强, 涡旋对霍尔电压的贡献渐减. 对于弱钉扎的情况 $\rho_{xy} \approx \rho_{xx}^2$, 当钉扎增强时, 这个标度关系就可能被破坏, 甚至导致霍尔电阻 ρ_{xy} 反号^[6]. 因此, 进一步研究与涡旋玻璃相变密切关联的磁通蠕动区的霍尔电阻率是非常必要的. Dorsey 和 Fisher^[8]基于涡旋玻璃转变假设^[9], 解释了令人困惑的标度关系 $\rho_{xy} \propto [\rho_{xx}(T)]^\beta$, 其中 $\beta = 1.7 \pm 0.2$, 与 Luo 等人^[3]的实验数据相符合. 他们认为, 霍尔效应

本身源于某种“电子-空穴”不对称, 而标度指数 β 则被认为和一个特定的电子-空穴不对称指数 $\lambda \approx 3$ 有关.

他们预言“非线性霍尔电场 E_y 在相变点附近应该展示出普适的标度性质, 并和电流密度 J_x 成普适的幂律关系”. 这一预言被 Wöltgens 等人的实验验证^[10], 在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 样品中, 实验得到的霍尔关联系数 $\lambda = 3.4 \pm 0.3$. 而且, 他们观察到的广域标度行为 $\rho_{xy} = A[\rho_{xx}(J_x, T)]^{2.0 \pm 0.2}$ 和 VGFB 提出的模型也符合^[7]. 基于 Bardeen-Stephen (B-S)^[11] 和 Nozières-Vinen (N-V)^[12] 的正常芯涡旋模型, Wang, Dong 和 Ting (WDT) 提出了一个统一的理论来解释霍尔效应的反号和标度行为^[13]. Xu 等人^[14] 又进一步解出了钉扎力 F_p 和涡旋速度 v_L 之间的标度函数, 并给出了一个霍尔电阻方程. 这个方程与霍尔电阻只有一次反号的 YBCO 的实验数据符合得很好, 但是它还未能描述存在二次反号的高温超导体, 例如 $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ (HBCCO) 等. 本文给出了一个关于霍尔电阻 ρ_{xy} 和霍尔角 θ_H 钉扎效应的普适标度律, 并提出了一个对于有一次或多次霍尔反号的高温超导体都适用的统一霍尔电阻方程.

2. 普适标度律

基于各种不同种类的高温超导体从超纯的

* 中国科技部(批准号: NKBRSG-G 1999064602)和国家自然科学基金(批准号: 10674005, 10174003, 50377040, 90303008)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yindl@pku.edu.cn

YBCO^[15]到 HBCCO^[4, 16-20]的实验数据,我们发现了关于霍尔电阻 ρ_{xy} 和霍尔角 θ_H 钉扎效应的普适标度律:

$$\frac{\rho_{xy}}{\rho_m} \approx f\left(\frac{B - B_0}{B_m - B_0}\right) \approx f'\left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\tan\theta_H}{\tan\theta_H^m} \approx \Phi\left(\frac{B - B_0}{B_m - B_0}\right) \approx \Phi'\left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right), \quad (2)$$

其中 ρ_m 和 $\tan\theta_H^m$ 是从低温或低场端算起,霍尔电阻和霍尔角的第一个极大值. B_m 和 T_m 是与该极大值对应的磁场和温度的值. B_0 和 T_0 则是对应于霍尔角和霍尔电阻从低温或低场端算起的第一个可测

点所对应的磁场和温度的值,这个标度关系和许恒毅等人在只存在一次霍尔反号的 YBCO 中发现的标度关系^[14]相合,同时也能描述存在二次反号的超导体.一般从原则上说,不同的样品中由于其具体的电子结构及钉扎状况不同,从它的实验数据中得出的标度函数 f, f' , 以及 Φ 和 Φ' 的实际函数形式可能会有差异,正如我们在以前关于超导材料的纵向体钉扎力密度 F_p 的 Kramer 型标度函数的行为中所见^[21].但是图 1 中的标度函数 f, f', Φ 以及 Φ' 却基本重合.这是一个很有意思值得深入探讨的现象.

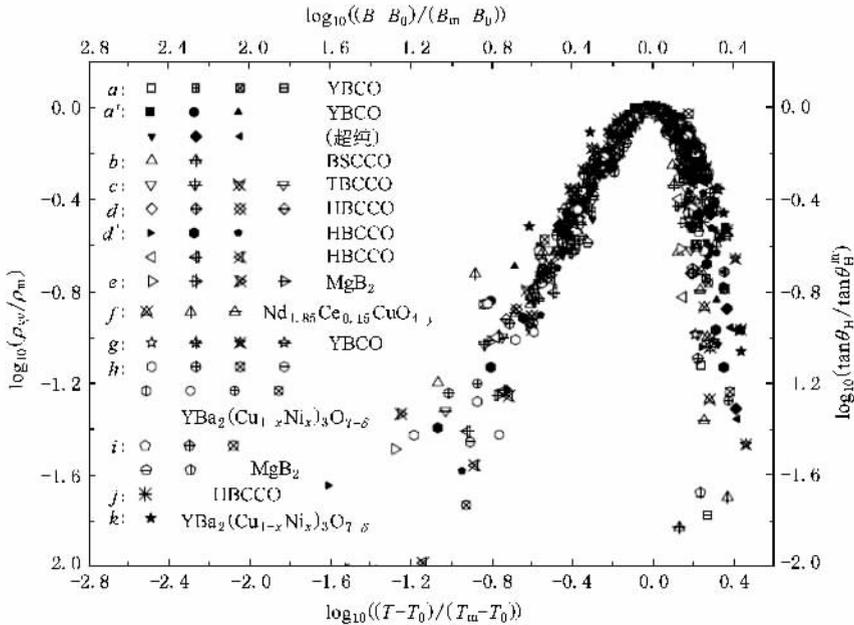


图 1 霍尔电阻 ρ_{xy} 和霍尔角 θ_H 的普适标度; a, b, c, d, e, f 表示不同类型的高温超导体霍尔电阻在不同的恒定磁场下,随温度变化的实验数据 $\rho_{xy}-T$ 按标度律 $\log_{10}(\rho_{xy}/\rho_m) - \log_{10}((T - T_0)/(T_m - T_0))$ 进行标度后的曲线; a', d' 表示霍尔角在不同的恒定磁场下,随温度变化的实验数据 $\tan\theta_H-T$ 按照标度律 $\log_{10}(\tan\theta_H/\tan\theta_H^m) - \log_{10}((T - T_0)/(T_m - T_0))$ 进行标度后的曲线; g, h, i, j 代表霍尔电阻在不同的恒定温度下,随磁场变化的实验数据 $\rho_{xy}-B$ 按照标度律 $\log_{10}(\rho_{xy}/\rho_m) - \log_{10}((B - B_0)/(B_m - B_0))$ 进行标度后的曲线; k 代表霍尔角在不同的恒定温度下,随磁场变化的实验数据 $\tan\theta_H-B$ 按照标度律 $\log_{10}(\tan\theta_H/\tan\theta_H^m) - \log_{10}((B - B_0)/(B_m - B_0))$ 进行标度后的曲线. a 表示 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-11}$; a' 表示超纯 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$ ^[15]; b 表示 $\text{Bi}_2\text{Si}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ ^[16]; c 表示 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ^[17]; d 表示 $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ ^[4]; d' 表示 $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ ^[18]; e 表示 MgB_2 ^[19]; f 表示 $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$ ^[11]; g 表示 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ^[22]; h 表示 Ni-掺杂的单晶 $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$, 其中 $x = 0.005, 0.015, 0.035$ ^[23]; i 表示 MgB_2 ^[19]; j 表示 $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ ^[20]; k 表示 Ni 掺杂的单晶 $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$, 其中 $x = 0.035$ ^[23]

3. 统一霍尔电阻方程

对磁通流动霍尔电导 σ_{xy} 的微观分析得到

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^0 + \sigma_{xy}^v, \quad (3)$$

第一项描述了涡旋芯内外的准粒子对电导 σ_{xy} 的贡献,它具有和正常态相同的符号并正比于 H . 第二项则是超导涡旋对 σ_{xy} 的流体动力学贡献.

根据霍尔电阻和霍尔电导 σ_{xy} 之间的普遍关系以及文献 14 中得到的霍尔电阻方程

$$\rho_{xy}(T) = \frac{\beta_0 B^2 \rho_n}{\phi_0 B_{c2}} \times \left\{ (1 + \bar{\gamma}) \frac{\rho_{xx}^2}{\rho_f^2} - 2\bar{\gamma} \frac{\rho_{xx}}{\rho_f} \right\}. \quad (4)$$

我们得出一组可以帮助理解有一次或两次反号情况的高温超导体的霍尔电阻性质的统一方程

$$\rho_{xy} = \frac{\beta_0 B^2 \rho_n}{\phi_0 B_{c2}} \left\{ (1 + \bar{\gamma}) \frac{\rho_{xx}^2}{\rho_f^2} - 2\bar{\gamma} \frac{\rho_{xx}}{\rho_f} \right\} \times \left\{ \frac{\sigma_{xy}^Q(T, B_m) + [\sigma_{xy}(T, B) - \sigma_{xy}^Q(T, B_m)] \mathcal{A}(B - B_m)}{\sigma_{xy}^Q(T, B_m)} \right\}, \quad (5)$$

$$\rho_{xy} = \frac{\beta_0 B^2 \rho_n}{\phi_0 B_{c2}} \left\{ (1 + \bar{\gamma}) \frac{\rho_{xx}^2}{\rho_f^2} - 2\bar{\gamma} \frac{\rho_{xx}}{\rho_f} \right\} \times \left\{ \frac{\sigma_{xy}^Q(T_m, B) + [\sigma_{xy}(T, B) - \sigma_{xy}^Q(T_m, B)] \mathcal{A}(T - T_m)}{\sigma_{xy}^Q(T_m, B)} \right\}, \quad (6)$$

方程(5)适用于温度恒定的情况,方程(6)适用于磁场恒定的情况.其中 ρ_f 和 ρ_{xx} 分别是无钉扎时磁通流动电阻和纵向非线性电阻,文献[14]给出了纵向电阻 ρ_{xx}/ρ_f 的扩展幂律形式

$$\frac{\rho_{xx}}{\rho_f} \equiv \Omega = \exp \left[-a \frac{U_c(B, T)}{kT} \times \left(1 + (\Omega - 1) \frac{J}{J_0(B, T)} \right)^p \right],$$

该方程与 Koch 等人^[24]以及 Strachan 等人^[25]在涡旋玻璃相变附近测量的 ρ_{xx} 实验结果符合得非常好^[26]. $\bar{\gamma}$ 的定义为 $\bar{\gamma} \equiv (1 - \bar{H}/H_{c2})$,其中 \bar{H} 是涡旋芯的平均磁场, γ 是涡旋芯表面的接触力^[13,14]. $\beta_0 \equiv \mu_m H_{c2}$,其中 $\mu_m = e\tau/m$ 是载流子的迁移率.上临界场 $H_{c2} = \Phi_0/2\pi\xi^2$. $\mathcal{A}(x)$ 是亥维赛函数.

4. 讨 论

不久以前,Nagaoka 等人对于多种高温超导体观察到一个令人惊异的结果.他们发现:当磁场高时,在所有的超导体中 σ_{xy} 都随着 H 线性增加;而在 H 降低时,对于欠掺杂的晶体 σ_{xy} 趋于 $-\infty$,但是对于

过掺杂的晶体, σ_{xy} 则趋于 $+\infty$.这种变化趋势尽管与很多理论模型的预言^[5,21]不一致,但我们的方程(5)却可以给出一个合理的解释.根据定义式(4)在磁场比较低时 $B < B_m$,应有关系式 $0 < \gamma < 1$ 以及 $\rho_{xy} \ll \rho_f$.因此我们可以得知方程(5)中左边大括号的符号应为负号.这就自然的解释了文献[5]的结论:在欠掺杂区域,霍尔电导是电子型的,而在过掺杂区域,霍尔电导是空穴型.

当磁场比较高时 $B > B_m$,方程(5)右边第二个大括号内的表达式是在用不同模型对电导进行微观分析后得到的对文献[14]中霍尔电阻表达式的扩展.在方程(5)和(6)的基础上,各种不同模型给出的预言就可以与实验结果进行对比,从而为我们理解高温超导体的机理提供一个可能的视角.

5. 结 论

我们发现了钉扎效应影响霍尔电阻 ρ_{xy} 和霍尔角 θ_H 的普适标度律.同时,提出了一个适用于各种高温超导体的统一霍尔电阻方程,这个方程可以解释 Nagaoka 等人发现的超导态霍尔反号对掺杂程度的依赖关系^[5].

- [1] Hagen S J, Smith A W, Rajeswari M, Peng J L, Li Z Y, Greene R L, Mao S N, Xi X X, Bhattacharya S, Li Q, Lobb C J 1993 *Phys. Rev. B* **47** 1064
- [2] Kang W N, Kang B W, Chen Q Y, Wu J Z, Bai Y, Chu W K, Christen D K, Kerchner R, Sung-IK Lee 2000 *Phys. Rev. B* **61** 722
- Kopnin N B 2002 *Report on Progr. in Physics*. **65** 1633
- Yu Z Q, Wu K, Ma X B, Nie R J, Wang F R 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 512 (in Chinese) [余增强, 吴克, 马小柏, 聂瑞娟, 王

福仁 2007 *物理学报* **56** 512]

- [3] Luo J, Orlando T P, Graybeal J M, Wu X D, Muenchausen R 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 690
- [4] Kang W N, Kang B W, Chen Q Y, Wu J Z, Yun S H, Gapud A, Qu J Z, Chu W K, Christen D K, Kerchner R, Chu C W 1999 *Phys. Rev. B* **59** R9031
- [5] Nagaoka T, Matsuda Y, Obara H, Sawa A, Terashima T, Chong I, Takano M, Suzuki M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3594

- [6] Kopnin N B ,Vinokur V M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4864
- [7] Vinokur V M ,Geshkenbein V B ,Feigel'man M V ,Blatter G 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1242
- [8] Dorsey A T ,Fisher M P A 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 694
- [9] Fisher M P A 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 1415
Fisher D S ,Fisher M P A ,Huse D A 1990 *Phys. Rev. B* **43** 130
- [10] Wöltgens P J M ,Dekker C ,de Wijn H W 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 3858
- [11] Bardeen J ,Stephen M J 1965 *Phys. Rev. A* **140** 1197
- [12] Nozières P ,Ninen W F 1966 *Philos. Mag.* **14** 667
- [13] Wang Z D ,Dong J M ,Ting C S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3875
- [14] Xu H Y ,Qi Z ,Wang W ,Yin D L ,Wang F R ,Li C Y 2002 *Phys. Rev. B* **66** 054513
- [15] Harris J M ,Yan Y F ,Tsui O K C ,Matsuda Y ,Ong N P 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 1711
- [16] Ri H C ,Gross R ,Gollnik F ,Beck A ,Huebener R P ,Wagner P ,Adrian H 1994 *Phys. Rev. B* **50** 3312
- [17] Hagen S J ,Lobb C J ,Greene R L ,Eddy M 1991 *Phys. Rev. B* **43** 6246
- [18] Kang W N ,Kang B W ,Chen Q Y ,Wu J Z ,Bai Y ,Chu W K ,Christen D K ,Kerchner R ,Lee S I 2000 *Phys. Rev. B* **61** 722
- [19] Jin R ,Paranthaman M ,Zhai H Y ,Christen H M ,Christen D K ,Mandrus D 2001 *Phys. Rev. B* **64** 220506(R)
- [20] Kim W S ,Kang W N ,Kim M S ,Lee S I ,Oh S I ,Chang Ho Choi ,Ri H C 2000 *Phys. Rev. B* **62** 3037
- [21] Kramer E J 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 1368
Koblishka M R 1997 *Physica C* **282-287** 2193
- [22] Chien T R ,Jing T W ,Ong N P ,Wang Z Z 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 3075
- [23] Kim J T ,Giapintzakis J ,Ginsberg D M 1996 *Phys. Rev. B* **53** 5922
- [24] Koch R H ,Foglietti V ,Gallagher W J ,Koren G ,Gupta A ,Fisher M P A 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 1511
- [25] Strachan D R ,Sullivan M C ,Fournier P ,Pai S P ,Venkatesan T ,Lobb C J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 067007
- [26] Xiang H U ,Li H E ,Ning Z H ,Chen K X ,Yin L ,Lu G ,Xu X L ,Guo J D ,Wang F R ,Li C Y ,Yin D L 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 3349

Universal scaling relations of the Hall resistivity and Hall angle near the vortex glass transition and the unified Hall resistivity equation *

He Li Hu Xiang Yin Lan Xu Heng-Yi Xu Xiao-Lin Guo Jian-Dong Li Chuan-Yi Yin Dao-Le[†]

(Department of Physics and State Key Laboratory for Microscopic Physics ,Peking University ,Beijing 100871 ,China)

(Received 8 May 2007 ; revised manuscript received 18 June 2008)

Abstract

Universal scaling relations of the pinning effect on the Hall resistivity ρ_{xy} and Hall angle θ_H were shown. Considering the extended power law form of ρ_{xx} and the microscopic analysis of σ_{xy} , we derive unified ρ_{xy} equations for superconductors with and without double sign reversal.

Keywords : high temperature superconductors , vortex glass transition , universal scaling behavior , unified ρ_{xy} equation

PACC : 6460 , 7430F , 7460E

* Project supported by the Ministry of Science & Technology of China(Grant No. NKBRSG-G 1999064602) and the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 10674005 ,10174003 ,50377040 ,90303008).

† Corresponding author. E-mail : yindl@pku.edu.cn