

# LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 超导参量的研究

边海琴, 孙爱民\*, 朱海滨

(西北师范大学 物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 用二带 G-L 模型研究了非磁性超导 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 和 YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的相干长度  $\xi(T)$ 、速率  $v_c(T)$ 、伦敦穿透深度  $\lambda(T)$  和临界电流密度  $j(T)$  在  $T_c$  附近对温度  $T$  的依赖关系.

**关键词:** 二带 G-L 理论; 非磁性超导; LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C; YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C

**中图分类号:** O 511

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-988X(2008)06-0038-03

## Research on superconducting state parameters of LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C, YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C

BIAN Hai-qin, SUN Ai-min, ZHU Hai-bin

(College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** Temperature dependence of the coherent length  $\xi(T)$ , critical velocity of Cooper pair  $v_c(T)$ , London penetration depth  $\lambda(T)$ , critical current density  $j(T)$  for the non-magnetic superconductors LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C, YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C, are studied in the vicinity of  $T_c$  by using a two-band G-L theory.

**Key words:** two-band G-L theory; non-magnetic superconductor; LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C; YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C

MgB<sub>2</sub> 在二元金属超导体中具有高的转变温度和相对简单的晶体结构<sup>[1]</sup>; 能带结构、声子计算表明 MgB<sub>2</sub> 是一个双能隙结构<sup>[2,3]</sup>; 在隧道测量及比热测量中表现出了非常强的二带特征. 人们认为 MgB<sub>2</sub> 属于各向异性 s-波超导体, 并且可用一个各向异性 s-波序参量来描述. 非磁性超导体 RNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C (R 代表 Lu 和 Y) 的转变温度约为 15~16 K, 而且常态为多带, 结构为四角晶格. 一般认为各向异性能隙模型与多带模型等价.

与常规超导体对比, LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、MgB<sub>2</sub> 的上临界磁场在临界温度  $T_c$  附近有正的曲率<sup>[4,6]</sup>. 为便于理解, Shulga 等人首先提出 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、MgB<sub>2</sub> 的双带 Eliashberg 模型<sup>[7]</sup>, Golubov 等人运用 Eliashberg 理论的第一原理计算了比热<sup>[8]</sup>. 双带模型被运用在磁性碳化硼上来解释临界场的凹角行为<sup>[9]</sup>, 也被成功地用

在 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、MgB<sub>2</sub> 超导体上, 来拟合上临界磁场  $H_{c2}(T)$ 、下临界磁场  $H_{c1}(T)$  及热力学临界磁场  $H_{cm}(T)$  等超导序参量与温度的关系.

笔者研究了 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的超导态的序参量: 相干长度  $\xi(T)$ 、临界速率  $v_c(T)$ 、伦敦穿透深度  $\lambda(T)$  和临界电流密度  $j_c(T)$  在二带 G-L 理论中与温度的关系. 在 G-L 理论框架下, 二阶参量的存在给出了超导参量对温度的依赖关系. 非线性强度主要依赖于两孤立带之间的耦合作用. 理论计算结果与超导体 MgB<sub>2</sub> 相应参量进行比较, 发现它们具有相似的行为, 故 G-L 理论模型能够准确地描述 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的超导电性.

### 1 基本原理方程

带有耦合序参量的二带 G-L 自由能函数可以表示为<sup>[10]</sup>

收稿日期: 2007-12-19; 修改稿收到日期: 2008-03-26

基金项目: 西北师范大学青年教师科研基金资助项目(NWNU-QN-07-42)

作者简介: 边海琴 (1972-), 女, 甘肃临洮人, 讲师, 硕士. 主要研究方向为低温与超导物理.

\* 通讯联系人, 教授, 硕士研究生导师. E-mail: sunam@nwnu.edu.cn

$$F[\Psi_1, \Psi_2] = \int d^3r \left[ F_1 + F_{12} + F_2 + \frac{H^2}{8\pi} \right],$$

$$F_i = \frac{\eta^2}{4m_i} \left| \nabla - \frac{2\pi i A}{\Phi_0} \right|^2 + \alpha_i(T) \Psi_i^2 + \frac{\beta}{2} \Psi_i^4,$$

$$F_{12} = \left[ \epsilon(\Psi_1 \Psi_2^* + \text{c.c.}) + \epsilon_1 \left[ \nabla - \frac{2\pi i A}{\Phi_0} \right] \times \Psi_1^* \left[ \nabla - \frac{2\pi i A}{\Phi_0} \right] \Psi_2 + \text{c.c.} \right]. \quad (1)$$

其中  $m_i$  是电子对的有效质量,  $F_i$  是单带的自由能,  $F_{12}$  是两带间的自由能耦合项, 系数  $\alpha_i = \gamma_i(T - T_{ci})$ , 若系数  $\beta$  与温度无关, 则  $\gamma$  为比例常数.  $\epsilon$ 、 $\epsilon_1$  描述二阶参量的耦合强度. 假定  $\Psi_i$  对空间的依赖关系很弱, 就可以认为超导体为各向同性 s-波超导体. 利用自由能方程(1)和相应的 G-L 方程<sup>[11]</sup>, 计算得到的方程如下

$$h_{c2} = \alpha_0^{-1} (-\theta - c_0 + (A\theta^2 + B\theta + c_0^2)^{0.5}),$$

$$h_{c2} = \frac{H_{c2}(T)}{H_{c2}(0)},$$

$$\tilde{H}_{c2}(T) = \frac{cT_c(\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2)}{\eta_e}. \quad (2)$$

其中

$$\theta = T/T_c - 1;$$

$$A = \frac{(x-1)^2}{(x+1)^2} + A_1 \eta^2, \quad A_1 = \frac{64\alpha_1 \alpha_e x^2}{(x+1)^2};$$

$$B = \frac{2(x-1)(\alpha_1 x - \alpha_e)}{(x+1)^2} + (\alpha_1 + \alpha_e) A_1 \eta^2 + 2B_1 \eta,$$

$$B_1 = 8\alpha_1 \alpha_e \frac{x}{x+1};$$

$$\alpha_0 = 1 - \frac{16x\eta^2 \epsilon^2}{\gamma_1 \gamma_2 T_c^2}, \quad \alpha_i = 1 - \frac{T_{ci}}{T_c};$$

$$x = \frac{\gamma_1 m_1}{\gamma_2 m_2}, \quad \eta = \frac{T_c m_2 \epsilon_1 \gamma_2}{\hbar^2 \epsilon},$$

$$c_0 = \frac{(\alpha_1 x + \alpha_e)}{(x+1)} + B_1 \eta.$$

## 2 计算结果分析

计算中用到的参数<sup>[11]</sup>如下:

LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的参数

$$A = 0.66, \quad B = -0.03, \quad \mu_0 H_{c2}(0) = 7.02 \text{ T},$$

$$T_{c1} = 9.8 \text{ K}, \quad T_{c2} = 2.3 \text{ K},$$

$$c_0 = 0.19, \quad x = 5, \quad \alpha_0 = 0.24;$$

YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的参数

$$A = 0.71, \quad B = -0.044, \quad \mu_0 H_{c2}(0) = 8 \text{ T},$$

$$T_{c1} = 10 \text{ K}, \quad T_{c2} = 1.825 \text{ K},$$

$$c_0 = 0.157, \quad x = 5,$$

$$\alpha_0 = 0.28, \quad D = \frac{\beta_1 \gamma_2^2}{\beta_2 \gamma_1^2} = 1.5.$$

### 2.1 相干长度 $\xi(T)$ 与温度 $T$ 的关系

相干长度与温度的关系为<sup>[12]</sup>

$$\frac{\xi(T)}{\xi(0)} = (h_{c2}(T))^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

图 1 给出了非磁性超导体 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的相干长度  $\xi(T)$  与温度  $T$  的关系曲线. 图 1 与文献[7]中 MgB<sub>2</sub> 的相干长度  $\xi(T)$  在  $T_c$  附近的变化相同.

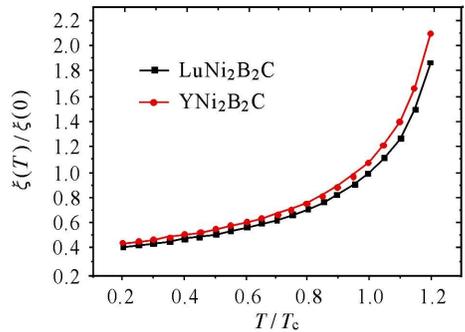


图 1 相干长度  $\xi(T)/\xi(0)$  与温度  $T/T_c$  的变化关系

Fig 1  $\xi(T)/\xi(0)$  versus reduced temperature

### 2.2 临界速率 $v_c(T)$ 与温度 $T$ 的关系

根据方程(3)与  $v_c = 2\eta/m_0 \xi(T)$  有

$$\frac{v_c(T)}{v_c(0)} = (h_{c2}(T))^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

图 2 给出了非磁性超导体 LuNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C、YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C 的临界速率  $v_c(T)$  与温度的关系曲线. 图 2 与文献[7]中 MgB<sub>2</sub> 的临界速率  $v_c(T)$  在  $T_c$  附近的变化相同.

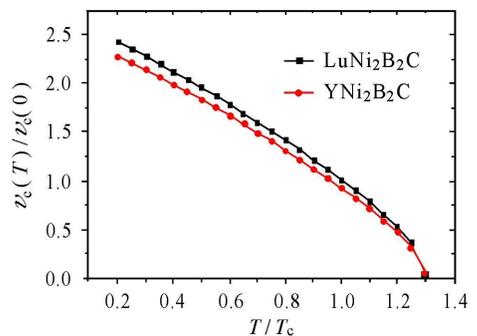


图 2 临界速率  $v_c(T)/v_c(0)$  与温度  $T/T_c$  的变化关系

Fig 2  $v_c(T)/v_c(0)$  versus reduced temperature

### 2.3 伦敦穿透深度 $\lambda(T)$ 与温度 $T$ 的关系

超导电子密度与伦敦穿透深度的关系为

$$\frac{n_s(T)}{n_s(0)} = \frac{\lambda^{-2}(T)}{\lambda^{-2}(0)}, \quad (5)$$

而伦敦穿透深度的关系式为<sup>[13]</sup>

$$\frac{\lambda^2(0)}{\lambda^2(T)} = -\frac{2}{x + D^{-1}} \cdot \left\{ \varepsilon^2 + x(\tau - \tau_{c1})^2 + 2x\eta\varepsilon^2(\tau - \tau_{c1}) \right\} \cdot \frac{\theta^2 + (2 - \tau_{c1} - \tau_{c2})}{\varepsilon^2 D(\tau - \tau_{c1}) + (\tau - \tau_{c2})^3}. \quad (6)$$

$$\tau_{c1,c2} = \frac{T_{c1,c2}}{T_c},$$

$$\lambda^2(0) = \frac{8\pi e^2 T_c}{c^2} \left[ \frac{\gamma_1}{\beta_1 m_1^*} + \frac{\gamma_2}{\beta_2 m_2^*} \right].$$

图3给出二带模型下的伦敦穿透深度 $\lambda(T)$ 与温度 $T$ 的依赖关系, 超导体 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 与 $\text{MgB}_2$ 的二带模型符合得很好. 而且实验<sup>[14]</sup>发现 $\text{MgB}_2$ 样品中伦敦穿透深度测量数据遵循如下式所示的规律:

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda(0)} = \frac{1}{(1 - T^{2.7})^{\frac{1}{2}}}.$$

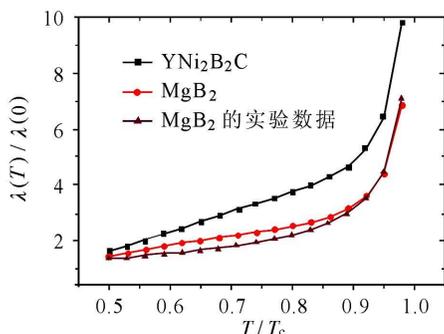


图3 穿透深度 $\lambda(T)/\lambda(0)$ 与温度 $T/T_c$ 的变化关系

Fig 3  $\lambda(T)/\lambda(0)$  versus reduced temperature

## 2.4 临界电流密度 $j_c(T)$ 与温度 $T$ 的关系

由方程(4)、(5)和 $j_c(T) = 2en_s(T)v_c(T)$ 有

$$\frac{j_c(T)}{j_c(0)} = \frac{\lambda^2(T)}{\lambda^2(0)} (hc_2(T))^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

图4所示为二带G-L模型下的临界电流密度与温度的依赖关系,  $\text{MgB}_2$ 与实验结果<sup>[7]</sup>基本符合. 超导 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 也具有相似的行为,  $T_c$ 附近曲线的曲率为正, 这是由于方程(1)中自由能梯度项的影响.

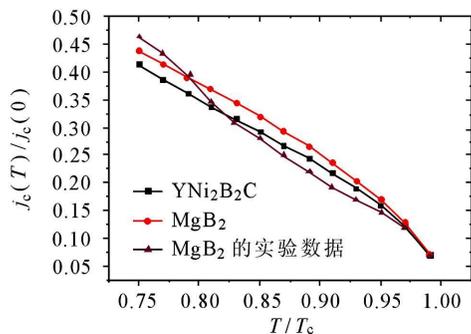


图4 临界电流密度 $j_c(T)/j_c(0)$ 与温度 $T/T_c$ 的变化关系

Fig 4  $j_c(T)/j_c(0)$  versus reduced temperature

## 3 结论

理论计算结果与 $\text{MgB}_2$ 的超导参数在 $T_c$ 附近对温度的依赖关系的行为相似, 在二带G-L理论下 $\text{MgB}_2$ 的理论结果与实验数据符合得很好<sup>[7]</sup>, 故G-L理论模型能够准确地描述 $\text{LuNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 的超导电性. 二带G-L理论在临界温度 $T_c$ 附近是适用的, 但是它作为唯象理论在低温区是不准确的. 要使理论与实验精确符合, 则必须得到G-L方程的精确解. 二带理论与实验数据的差异归因于这样一个事实: 计算的超导体不是s-波超导体, 而是各项异性的. 另外, 梯度项的相互作用对超导参量与温度的关系影响也较大.

## 参考文献:

- [1] NAGAMATSU J, NAKAGAWA N, MURANAKA T, et al. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride [J]. *Nature*, 2001, **410**: 63-64.
- [2] KORTUS J, MAZIN I I, BELASHCHENKO K D, et al. Superconductivity of metallic boron in  $\text{MgB}_2$  [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(20): 4656-4659.
- [3] LIU A, MAZIN I I, KORTUS J. Beyond eliasberg superconductivity in  $\text{MgB}_2$ : anharmonicity two-phonon scattering and multiple gaps [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**(8): 087005-087008.
- [4] FREUDENBERGER J, DRECHSLER S L, FUCHS G, et al. Superconductivity and disorder in  $\text{Y}_x\text{Lu}_{1-x}\text{Ni}_2\text{B}_2\text{C}_2$  [J]. *Phys C*, 1998, **306**: 1-6.
- [5] NOHARA M, ISSHIKI M, TAKAGI H, et al. Magnetic field dependence of the low-temperature specific heat of the borocarbide superconductor  $\text{LuNi}_2\text{B}_2\text{C}$  [J]. *J Phys Soc Jpn*, 1997, **66**(7): 1888-1891.
- [6] BUD'KO S, PETROVIC C, LAPERTOT G, et al. Magnetoresistivity and  $H_{c2}(T)$  in  $\text{MgB}_2$  [J]. *Phys Rev B*, 2001, **63**(22): 220503-220505.
- [7] ASKERZADE I N. Temperature dependence of some superconducting state parameters of a bulk  $\text{MgB}_2$  in two-band G-L theory [J]. *Phys C*, 2003, **390**: 281-285.
- [8] GOLUBOV A A, KORTUS J, DOLGOV O V, et al. Specific heat of  $\text{MgB}_2$  in a one- and a two-band model from first-principles calculations [J]. *J Phys Condens Matter*, 2002, **14**(6): 1353-1360.

(下转第53页)

求取 10 次采样值的和, 平均值可以在主程序中需要用到采样值的地方求取. 10 次采样结果的和保存在 ADH、ADL 两个寄存器中. TEMP 寄存器用于控制 AD 采样次数, 在每一次 AD 采样周期开始时, COUNT 寄存器的值为 10.

### 3 结语

上述数据采集系统在设计方面充分利用 PIC 单片机自身的软硬件资源, 大大降低了软硬件设计的复杂度和整个系统开发、维护的成本, 提高了系统的可靠性. 相比其它实现方案, 具有使用器件少、节约成本、调试方便等特点, 很好地满足了数据采集系统对实时性、同步性、高速性的要求. 此系统在申请时配上不同的传感器及相应的处理电路, 稍加改动, 便可在许多领域得到广泛应用, 因而具有较高的实用性和开发价值.

### 参考文献:

- [1] 冉策方, 周国忠. 基于 Compact PCI 总线的数据采集系统设计[J]. 微计算机信息, 2006, 22(12-2): 44-46.
- [2] 刘丽娜, 安颖. 基于单片机的多通道数据采集板的设计[J]. 河北能源职业技术学院学报, 2005(1): 66-67.
- [3] 杨博, 李宛洲. 基于单片机的新型多路数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2006(11): 45-46.
- [4] 李雯霏, 刘增力, 杨长茂. 基于 16 位单片机 80C196 的智能化高速数据采集系统设计[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 43-45.
- [5] 孙沁梅, 容太平. 多路数据循环采集系统设计[J]. 电子世界, 2005(5): 25-26.
- [6] 求是科技. PIC 单片机典型模块设计实例导航[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

(责任编辑 孙晓玲)

(上接第 40 页)

- [9] DOH H, SIGRIST M, CHAO B K, et al. Phenomenological theory of superconductivity and magnetism in  $\text{Ho}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Ni}_2\text{B}_2\text{C}$  [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 83(25): 5350-5353.
- [10] ASKERZADE I N, TANATAR B. Angle dependence of upper critical field in two-band G-L theory [J]. *Phys C*, 2007, 459: 56-61.
- [11] ASKERZADE I N. G-L theory for two-band s-wave superconductors: application to non-magnetic borocarbides  $\text{LuNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ,  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  and magnesium diboride  $\text{MgB}_2$  [J]. *Phys C*, 2003, 397: 99-111.
- [12] ASKERZADE I N, GENCER A, GÜCLÜ N. On the Ginzburg-Landau analysis of the upper critical field  $H_{c2}$  in  $\text{MgB}_2$  [J]. *Supercond Sci Technol*, 2002, 15: L13-L16.
- [13] ASKERZADE I N, GENCER A. London penetration depth  $\lambda(T)$  in two-band Ginzburg-Landau theory: application to  $\text{MgB}_2$  [J]. *Solid State Communications*, 2002, 123: 63-67.
- [14] CHEN Xian-hui, XUE Y Y, MENG R L, et al. Penetration depth and anisotropy in  $\text{MgB}_2$  [J]. *Phys Rev B*, 2001, 64(17): 172501-172504.

(责任编辑 孙晓玲)