

MgB₂ 超导体参量的拟和简化计算

朱海滨¹, 孙爱民², 边海琴²

(1 西北师范大学实验室与设备管理处, 兰州 730070; 2 西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

摘要: 关联长度 ξ 、临界 Cooper 对速度、London 穿透深度 λ 以及临界电流密度 j_c 与温度 T 的变化关系一直是二硼化镁超导体倍受关注的焦点。文中在各向同性的 GL 理论的框架内对以上参量随温度的变化关系通过计算机进行拟和, 得出了数学形式相对简单、物理内涵又比较清晰的数学表达式, 达到了对 MgB₂ 超导体参量拟和简化计算的目的。

关键词: 超导; 关联长度; 临界 Cooper 对速度; London 穿透深度; 临界电流密度

The simple numerical method in parameters of superconducting state of MgB₂ superconductor

Zhu Haibin¹, Sun Aimin², Bian Haiqin²

(1. Department of Laboratory and Equipment of Northwest Normal University Lanzhou 730070, China;

2. College of Physics and Electronic Engineering of Northwest Normal University Lanzhou 730070, China)

Abstract: Temperature dependence of the coherent length $\xi(T)$, critical velocity of Cooper pair $v_c(T)$, London penetration depth $\lambda(T)$ and critical current density $j_c(T)$ for the bulk superconducting magnesium diboride is extensively paid close attention. In the framework of GL theory, by means of numerical method whose mathematical form is relative simple and physical meaning is clear. The mathematical form of MgB₂ parameters becomes simple.

Key words: Superconductivity; Coherent length; Critical velocity of Cooper pair; London penetration depth; Critical current density

1 引言

关联长度、临界 Cooper 对速度、London 穿透深度以及临界电流密度是反映二硼化镁超导体基本性质的重要物理量, 对这些参量的研究无论是理论上还是实验上都一直没有停止过。尤其是这些参量随温度 T 的变化关系, 直接反映了 MgB₂ 超导体的基本性质, 因而引起超导学家的广泛关注。

关于关联长度、临界 Cooper 对速度、London 穿透深度以及临界电流密度在理论计算和实验测量方面, 已经有很多文献^[1-4]进行过报道。尤其在理论研究方面, 沈东星^[5]等人的文章中已经对上述参量作了系统的理论计算, 但是所给出的关系式比较复杂, 物理内涵也比较模糊。因此, 本文在此基础上, 通过数值拟和, 使以上参量随温度的变化关系在确保精度的同时进行了合理的简化, 得出了数学形式相对简单、物理内涵又比较清晰的数学表达式。

2 关联长度的拟和研究

规范化关联长度表示如下:

$$\xi_c(t) / \xi_c(0) = (h_c(t))^{-1/2} \quad (1)$$

其中, 规范化上临界场 $h_c(t) = h_c(T) / H_{c2}(0)$; $H_{c2}(0) = cT_c(\gamma_1 m_1^* + \gamma_2 m_2^*) / h\epsilon$ $t = T/T_c$ 。

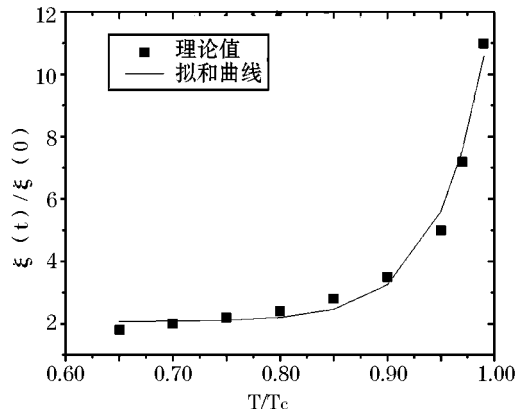


图 1 规范化关联长度随约化温度的变化关系

Fig 1 Relationship between $\xi_c(t) / \xi_c(0)$ and T/T_c

收稿日期: 2008-05-19

作者简介: 朱海滨 (1981-) 男, 硕士研究生, 主要从事低温与超导研究。

根据理论计算的结果,应用计算机拟和得到如下表达式:

$$\xi(t) / \xi(0) = y_0 + A_1 e^{t/\tau} \quad (2)$$

其中, $y_0 = 2.06678$; $A_1 = 3.0148E-9$; $\tau = 0.04549$ 。方程 (2) 给出了规范化关联长度随约化温度的变化曲线。图 1 给出了理论计算结果与数值模拟结果的比较,从图 1 可以看出两者符合的比较。

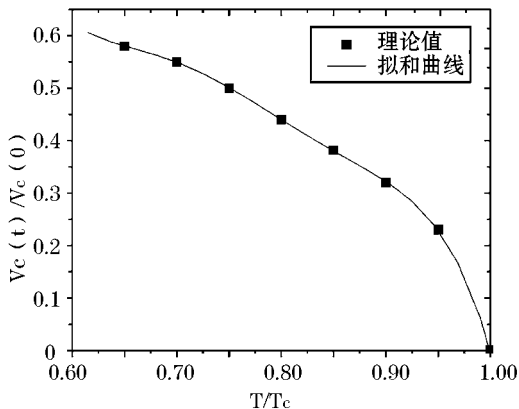


图 2 规范化 cooper 对速度随约化温度的变化关系
Fig 2 Relationship between $V_c(t) / V_c(0)$ and T/T_c

3 临界 Cooper 对速度的拟和研究

临界 Cooper 对速度 $v_c = 2\hbar / m_0 \xi(T)$, 其中, m_0 是双带超导体中 Cooper 对的有效质量, 结合方程 (1), 我们得到: $v_c(t) / v_c(0) = (\hbar v_c)^{1/2}$ (3)

根据以上理论计算的结果, 通过拟和得到如下表达式:

$$v_c(t) / v_c(0) = A + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3 + B_4 t^4 + B_5 t^5 \quad (4)$$

其中, $A = 166.42827$; $B_1 = -1101.64472$; $B_2 = 2911.05117$; $B_3 = -3822.03497$; $B_4 = 2492.35431$; $B_5 = -646.15385$ 。

方程 (4) 给出了规范化临界 Cooper 对速度与约化温度的关系; 图 2 给出了拟和结果和理论结果的比较。从图中可以看出方程 (4) 给出的拟和曲线和理论计算值完全符合。

4 London 穿透深度的拟和研究

London 穿透深度表示如下: $\lambda^2(T) / \lambda^2(0)$

$$= \frac{2}{x + D} (\tilde{\epsilon}^2 + x(\tau - \tau_{cl})^2 + 2x\eta\tilde{\epsilon}^2(\tau - \tau_{cl}))$$

$$\times \left\{ \frac{\theta^2 + (2 - \tau_{cl} - \tau_{e2})\theta}{\tilde{\epsilon}^2 D (\tau - \tau_{e2}) + (\tau - \tau_{cl})^3} \right\} \quad (5)$$

其中, $D = \beta_1 \gamma_2^2 / \beta_2 \gamma_1^2$, 在计算时取 $D = 1.35$;

$$\tau_{cl, e2} = T_{cl, e2} / T_c;$$

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

为了得到 $\lambda(t) / \lambda(0)$ 的表达式, 根据以上理论计算的结果, 通过数值拟和得到如下表达式:

$$\lambda(t) / \lambda(0) = y_0 + A_1 e^{(-t-x_0)/\tau} + A_2 e^{(-t-x_0)/\tau} \quad (6)$$

其中, $y_0 = 0.82055$; $x_0 = 0.70761$; $A_1 = 0.46416$; $\tau = T/T_c$; $t = 0.31258$; $A_2 = 9.6567E-7$; $t = 0.01827$ 。

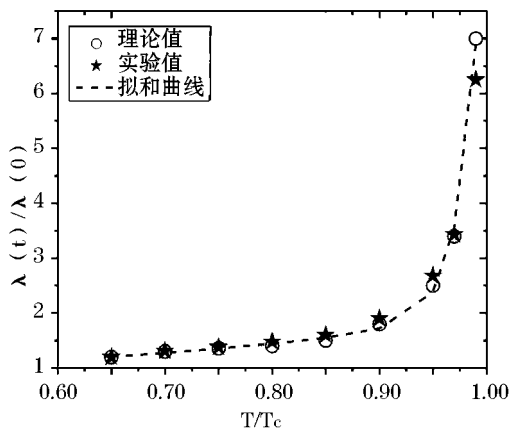


图 3 规范化穿透深度随约化温度的变化关系
Fig 3 Relationship between $\lambda_c(t) / \lambda_c(0)$ and T/T_c

方程 (6) 给出了规范化穿透深度随约化温度的变化的关系曲线; 图 3 给出了拟和结果与理论值和实验值的比较。从图中可以看出, 该拟和方程和理论与实验值符合的都很好。

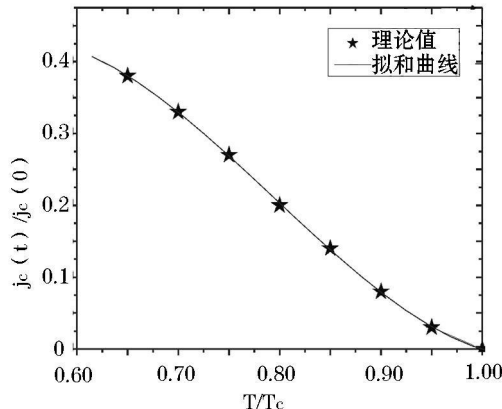


图 4 规范化临界电流密度与约化温度的变化关系
Fig 4 Relationship between $j_c(t) / j_c(0)$ and T/T_c

5 临界电流密度的拟和研究

Cooper对导电的电流密度为 $j_c(t) = 2en_s v_c(t)$, 结合方程 (3) 我们得到以下关系式:

$$\frac{j_c(t)}{j_c(0)} = \frac{\lambda^2(0)}{\lambda^2(T)} h_{c2}^{1/2}(t) \quad (7)$$

根据以上理论计算的结果通过拟和, 我们得到如下表达式:

$$j_c(t) / j_c(0) = A + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3 \quad (8)$$

其中, $A = -2.28667$; $B_1 = 12.0728$, $B_2 = -16.85714$; $B_3 = 7.07071$ 。

方程 (8) 给出了规范化临界电流密度随约化温度的变化关系; 图 4 给出了拟和结果和理论结果比较。从图 4 中可以看出, 方程 (8) 所给出的表达式与理论计算结果完全吻合。

6 结论

关联长度 ξ 、临界 Cooper对速度、London穿透深度 λ 以及临界电流密度 j_c 是超导研究中非常重要的物理量, 利用计算机拟和的方法我们得到

方程 (2)、(4)、(6)、(8) 并给出了对应的参数值。这些方程分别在确保精度的前提下, 简单直观的描述了关联长度 ξ 、临界 Cooper对速度、London穿透深度 λ 以及临界电流密度 j_c 随温度 T 的变化关系, 为上述物理量的理论计算带来了方便。

参考文献

- [1] Fletcher J D, Carrington A, Taylor O J. Temperature-dependent anisotropy of the penetration depth and coherence length of MgB_2 [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95, 097005.
- [2] Di Castro D, et al. Pressure effect on the magnetic penetration depth in MgB_2 [J]. *Phys Rev B*, 2005, 72, 094504.
- [3] Horvat J et al. Effect of sample size on magnetic J_c for MgB_2 superconductor [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84, 3109.
- [4] Botta D, et al. Temperature field and current dependence of the flux creep activation energy in bulk MgB_2 [J]. *Physica C*, 2002, 369, 232.
- [5] 沈东星, 孙爱民, 等. MgB_2 超导体参量的理论研究 [J]. *低温物理学报*, 2005, 27(4): 298.

(上接 21 页)

4 封装方法

由于基片属于陶瓷材料, 很脆, 容易碎, 尤其是尺寸大的基片。因此, 安装时必须保证基片在封装和以后的测试中不会受到力或者是受力不均匀。同时, 基片和盒子底部要有良好的接触, 即在测试中有良好的接地, 否则它们之间的空气间隙会有很差的热传导, 也会成为电磁波的通道, 最终导致超导滤波器的性能变得很差。

5 结论

对于超导微波电路的封装需要注意很多问题, 其中有诸多因素解决不好都会影响微波电路

的性能, 这就需要设计一个符合超导电路测量的封装盒和一套安装滤波器的方法。通过不断的实验改进, 解决了诸多封装难题, 最终的封装结果可以达到低温测试要求。

致谢: 感谢清华大学物理系超导电子学研究实验室提供的实验测量。

参考文献

- [1] 沈致远 [美]. 高温超导微波电路 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] 慕利娟, 等. 氩离子刻蚀对高温超导 YBCO 薄膜物理特性的影响 [J]. *低温物理学报*, 2006, 28(2): 134-137.