

强磁场下的温度控制与测量

郭树权 崔长庚 姚成国

(中国科学院物理研究所)

摘 要

SrTiO₃ 电容基本上不受磁场影响,但是它的灵敏度和使用温区有限,更大的缺点是测量时必须等半个多小时才能稳定,给实验带来不便. 渗碳玻璃电阻温度计(CGRT)受磁场的影响比较小,其磁阻值可以精确计算. 本文介绍了用在磁场中测量到的 CGRT 的电阻值,计算出磁阻造成温度误差,从而得到温度的精确值. 为了使用方便,本文给出了磁阻造成温度误差的修正表,从而较方便地基本上消除了磁场造成的误差. 在温度为 4.2—88K, 磁场为 0—19T 时, 磁场造成误差小于 0.1%; 在 88—306K, 0—19T 时, 误差小于 0.2%. 本文还介绍了用 CGRT 在强磁场中精确控温的方法.

由于超导磁体的广泛使用,强磁场下许多物理特性与温度的关系,已成为低温物理实验的重要内容之一,强磁场下温度的测量与控制已成为很有意义的课题.

各种电阻敏感元件例如金属膜电阻、半导体电阻、二极管正向电阻等,它们的电阻值不仅随温度的变化而变化,而且由于磁阻效应,其电阻值还随着磁场的变化而变化. 所以,在使用这些电阻敏感元件时,由于磁场的存在,必然要产生误差. 例如,用于低温温度测量优点最多的 Ge 电阻温度计,在 4.2K 及磁场为 8T 时,误差高达 50% 以上,磁场越强,误差越大. 所以,许多电阻敏感元件在强磁场下根本不能使用^[1]. 渗碳玻璃电阻温度计(CGRT)的重现性,稳定性比碳电阻要好得多,并且使用温区宽,灵敏度高,磁阻效应又比较小,所以被国内外大多数实验室所采用,特别是用于强磁场中的温度测量.

由于 CGRT 的磁阻值可以用一些简单的经验公式来计算^[2],这为用 CGRT 进行强磁场中的温度精确控制与测量提供了可能.

一、强磁场下用电容进行温度控制与测量的优缺点

虽然 SrTiO₃ 电容几乎不受磁场的影响,

用它进行强磁场下温度的控制与测量的仪器和探头都已商品化,不少文章高度赞扬和评价了电容控温的方法. 但是,它存在许多不足之处,例如灵敏度不太高,在温度范围为 50—80K,和 180K 以上,由于灵敏度太低而不能使用. 另一个更大的缺点是每测量一个点必须耐心地等待半个多小时. 这是因为,在 65K 附近 SrTiO₃ 微晶玻璃有一个结构变化. 另外,还因为由于温度变化会造成电容的膨胀(或收缩)以及电致收缩等^[3], SrTiO₃ 微晶玻璃要出现结构弛豫,此过程要经过半小时以上才能稳定. 所以,在改变温度、调整电容控温仪时,要在电桥平衡点附近进行,尽量避免控温电桥大的不平衡. 控温电桥不平衡越大,电容上电压变化越大,电致收缩就越厉害,造成的不稳定性也就越厉害,需要稳定的时间就越长. 测量过程中,如果等待时间不够,在测量过程中会出现几十毫度到几百毫度的漂移(误差). 此外电容控温仪设备昂贵,需要进口,所以寻找强磁场中温度控制与测量的新方法是有意义的.

二、用 CGRT 在强磁场下进行温度的精确控制与测量的方法

虽然 CGRT 在磁场中误差比较小,但是要进行精确测量特别是在非常强的磁场中,还

表 1 磁阻造成的温度误差

| 温度 误差 | 磁场 (T) | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 4.2 | -0.016 | -0.026 | -0.037 | -0.050 | -0.065 | -0.081 | -0.093 | -0.12 |
| 7.0 | -0.022 | -0.036 | -0.052 | -0.070 | -0.090 | -0.11 | -0.14 | -0.16 |
| 10.0 | -0.018 | -0.029 | -0.042 | -0.057 | -0.073 | -0.091 | -0.11 | -0.13 |
| 15.0 | -0.011 | -0.018 | -0.026 | -0.035 | -0.045 | -0.056 | -0.067 | -0.080 |
| 17.8 | -0.010 | -0.012 | -0.014 | -0.017 | -0.021 | -0.027 | -0.032 | -0.038 |
| 25.5 | 0.010 | 0.015 | 0.016 | 0.023 | 0.031 | 0.040 | 0.051 | 0.063 |
| 40.0 | 0.016 | 0.029 | 0.046 | 0.067 | 0.092 | 0.12 | 0.15 | 0.19 |
| 60.0 | 0.028 | 0.051 | 0.081 | 0.117 | 0.160 | 0.209 | 0.265 | 0.326 |
| 70.0 | 0.033 | 0.061 | 0.097 | 0.141 | 0.192 | 0.251 | 0.317 | 0.391 |
| 80.0 | 0.038 | 0.071 | 0.112 | 0.162 | 0.221 | 0.289 | 0.365 | 0.451 |
| 90.0 | 0.043 | 0.079 | 0.125 | 0.181 | 0.247 | 0.323 | 0.409 | 0.504 |
| 100.0 | 0.047 | 0.086 | 0.137 | 0.198 | 0.270 | 0.353 | 0.447 | 0.552 |
| 150.0 | 0.078 | 0.143 | 0.227 | 0.329 | 0.449 | 0.587 | 0.742 | 0.916 |
| 200.0 | 0.099 | 0.183 | 0.290 | 0.421 | 0.574 | 0.750 | 0.950 | 1.172 |
| 250.0 | 0.113 | 0.209 | 0.331 | 0.480 | 0.655 | 0.857 | 1.084 | 1.339 |
| 300.0 | 0.119 | 0.221 | 0.351 | 0.508 | 0.693 | 0.907 | 1.148 | 1.418 |

是不行,例如在 4.21K, 19T 时, 误差高达 330 mK。

由于 CGRT 的磁阻可以用简单的公式进行精确计算^[2], 磁场造成的误差可以消除, 所以用 CGRT 进行强磁场下温度的精确控制与测量是完全可能的。下面先介绍用 CGRT 进行强磁场下精确测温的具体方法。

计算磁阻的公式为

$$100\Delta R/R_0 = f(T)g(H), \quad (1)$$

其中 R_0 为磁场为零时 CGRT 的电阻值, 它仅仅是温度的函数; ΔR 为 CGRT 的磁阻值; $f(T)$ 和 $g(H)$ 分别为 T 和 H 的函数, 具体表达式见文献[2]。

由于磁阻效应, 在磁场为 H 、温度为 T 时 (温度 T 是待求的未知物理量) 测量到 CGRT 的电阻值不是 R_0 , 而是 R , $R = R_0 + \Delta R_0$ 。从 CGRT 温度表查出 R 对应的温度为 T_1 , T_1 作为温度 T 的一级近似, 用(1)式算出和 H , T_1 对应的磁阻 ΔR_1 ; 根据 $R - \Delta R_1 = R_1$, 再查 CGRT 温度表, 得到与 R_1 对应的温度 T_2 (温度 T 的二级近似), 同样算出和 H 和 T_2 对应的磁阻 ΔR_2 ; 根据 $R - \Delta R_2 = R_2$, 查表得 T_3 (温

度 T 的三级近似)。此时, T 与 T_3 之差小于 5 mK, 这样就获得了强磁场中温度的精确值。

对于 Lake Share 公司生产的 CGRT, 它的磁阻特性可以用磁阻平均值来代替^[4]。把磁阻平均值造成的温度误差列成表, 本文给出表中的部分数据(表1), 供大家在强磁场中用 CGRT 测温时, 修正磁阻造成的误差时使用。对大多数的 CGRT^[4], 此表对磁阻造成误差的修正效果很好, 可使磁阻造成的误差修正到小于 5mK。

在使用时, 只须根据实验测量到的电阻值 R , 查 CGRT 温度表, 得温度的一级近似 T_1 , 然后再查磁阻造成的误差表 $T_1 - T_3$, 两个表的值相减就得到温度的三级近似 T_3 , T 与 T_3 的误差小于 5mK。

同样, 强磁场中温度的精确控制问题也可以得到解决, 具体做法如下:

在温度不变时, 磁阻值只随磁场变化, 并且呈很简单的抛物线规律, 所以可将此变化规律编到控温程序中。如果使用不带程序的控温电桥, 例如 DW-702 控温仪, 那么在控温过程中, 当磁场变化时, 控温电桥中的电阻箱 (或者

(下转第 510 页)