

文章编号:1005-4642(2022)05-0035-06

专题



从高温超导交流抗磁性实验中 学习超导电性的教学探索

何振辉¹, 刘艳芬¹, 赵芳²

(1. 中山大学 物理与天文学院, 广东 珠海 519082;
2. 温州大学 机电工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 高温超导陶瓷的电磁性质可以成为物理专业本科生基于实验的学习对象。同时, 超导实验涉及到真空技术、低温技术、热学、电磁学等多学科, 学生在通过实验学习新知识的同时, 以学以致用的方式巩固已有知识, 提升探索新知识的能力。在实验项目设计时拆解相关的知识点, 组建对应实验装置模块并提供待探索的问题。以 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 烧结陶瓷样品为例, 介绍了交流磁化率表征抗磁性以及外加直流磁场对样品超导转变的影响, 其中包括实验装置的设计和改进以及基于该实验装置开展实验教学的情况。

关键词: 超导电性; 转变温度; 交流磁化率; 磁场

中图分类号: G642.423; O511

文献标识码: B

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.05.006

体现宏观量子现象的超导电性是大学物理教学中的重要知识点。超导电性的科学理论一直是实验领先于理论研究, 体现出实验对复杂体系研究的重要性, 这使超导电性成为近代物理实验教学的重要内容之一。高温超导体可降低实验成本, 使该教学实验的普及成为可能。高温超导实验项目多基于直流四引线法测量超导体的电阻随温度变化^[1-3], 少数学校开发出超导转变表征的另一常用手段——交流磁化率实验^[1,4-5]。由于交流磁化率实验的本质是零电阻(理想导体)而非迈斯纳效应^[6], 且交流磁化率测量对技术和仪器的要求较高, 极少学校开设该实验内容。有关迈斯纳效应的教学多基于磁悬浮的演示实验^[1,7]; 也有学校用贵重的科研仪器——直流超导量子干涉器件(DC-SQUID), 展示或测量迈斯纳效应^[8]。超导临界磁场是与临界温度、临界电流并重的知识点, 鉴于目前超导电性的重要应用都与磁场有关, 如高分辨核磁共振成像、欧洲核子中心 ATLAS 实验超导磁体和我国正在研发的高温超导磁悬浮高铁等, 中山大学物理与天文学院(珠海校区)在建设近代物理实验课程时, 有意将磁场对超导电性的影响作为知识点引入到实验内容中, 提供包括交流磁化率测量的方法和仪器。本文从交流磁

化率实验方法和实验装置出发, 探讨对应的教学内容和方法, 尤其是针对未充分学习超导电性理论课程的物理专业本科生, 如何通过实验学习研究超导电性。

1 实验设计

1.1 知识结构

知识结构要求包含鉴别超导电性的 2 个基本特征: 零电阻与抗磁性(迈斯纳效应), 以及表征超导电性的 3 个基本参量: 临界温度、临界磁场和临界电流。目前超导电性实验教学多为零电阻和超导转变温度(临界温度), 临界电流因对样品和仪器要求较高, 对样品具有破坏性, 对易得样品失超物理机理的复杂性, 不宜作为本科生实验项目。

理论上, 迈斯纳效应是区分理想导体与超导体的依据。技术上, 交流法所测量的抗磁性本质上是理想导体的零电阻效应。此外, 高温超导体是极端的Ⅱ类超导体, 其单晶的本征下临界磁场低而上临界磁场高, 给测量临界磁场的实验教学带来困难。容易获得的超导样品为陶瓷(多晶), 其晶粒间存在的弱超导耦合(也称弱连接), 给直流法探测迈斯纳效应带来了较大的难度。

从实验教学的角度来审视交流磁化率测量,

收稿日期: 2021-09-17; **修改日期:** 2021-12-18

作者简介: 何振辉(1963—), 男, 广东顺德人, 中山大学物理与天文学院教授, 博士, 主要从事物理实验教学和空间科学实验研究。E-mail: stshzh@mail.sysu.edu.cn

超导转变的抗磁性可以提供与迈斯纳效应相同的结果和体验。陶瓷超导体中超导晶粒之间的超导弱连接很容易被较弱的磁场破坏, 可视为表观临界磁场(H_c^*)较低的超导体, 为研究磁场对超导的影响提供了性质类似的教学实验选项。因此, 尝试提供抗磁性和外磁场影响的实验内容, 而且要告知学生: 交流磁化率不能验证迈斯纳效应, 实验所测量到的表观临界磁场不是超导体的本征临界磁场。

1.2 技术方案

1.2.1 交流磁化率测量装置

磁化率表征材料对外加磁场(变化)的响应, 对外加磁场响应的定义为直流磁化率 χ , 对外加磁场变化响应的定义为交流磁化率 $\tilde{\chi}$ 。对于小振幅交变磁场, 交流磁化率 $\tilde{\chi}$ 反映的是材料磁化曲线的斜率, 也称微分磁化率。

$$M = \chi H, \quad (1)$$

$$\tilde{\chi} = \frac{\partial M}{\partial H}, \quad (2)$$

其中, H 为磁场强度, M 为磁化强度。

通常通过 1 对缠绕在一起的互感线圈测量交流磁化率(图 1), 产生磁场的线圈称为初级线圈, 检测样品磁响应的线圈称为次级线圈。单个次级线圈感应的电动势与线圈内部磁感应强度 $B(t)$ 的变化率成正比(考虑了楞次定律):

$$\tilde{\epsilon}_2 = k_2 \frac{\partial \tilde{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

其中, k_2 为负数。因 $\tilde{B} = \mu_0 (\tilde{H} + \tilde{M})$, 联立式(2), 式(3)可以写为

$$\tilde{\epsilon}_2 = k_2 \mu_0 (1 + \tilde{\chi}) \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t}. \quad (4)$$

由于在理想环境下, 线圈内部产生的磁场强度 \tilde{H} 与初级线圈的电流 \tilde{I}_1 成正比, 故根据式(4)可得交流磁化率为

$$\tilde{\chi} = \frac{\tilde{\epsilon}_2}{k_1 k_2 \mu_0 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}} - 1, \quad (5)$$

其中, $\tilde{I}_1 = CV_0 \exp [i(\omega t + \theta_I)]$, $k_1 k_2 \mu_0 (1 + \chi')$ 为互感系数。可见, 通常交流磁化率是复数, 即 $\tilde{\chi} = \chi' - i\chi''$ 。一般来说, 当在线圈内插入待测样品 ($\chi \neq 0$) 后, 则待测样品的磁性改变了原线圈的互感系数, 从而改变了该次级线圈(亦称检测线圈)的交流响应强度, 但次级线圈的感应电动势并不直接正比于样品的交流磁化率。

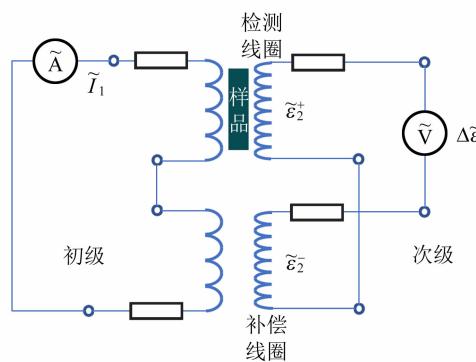


图 1 交流磁化率测量原理图

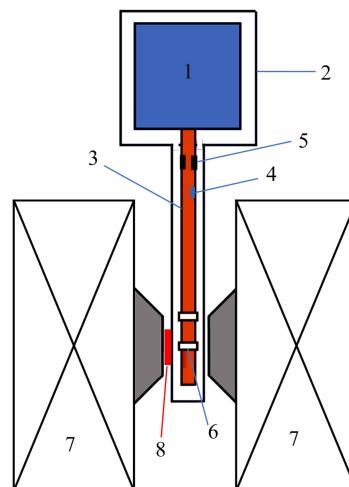
对于顺磁性和弱抗磁性材料, $\chi' \ll 1$, 式(4)所示的信号远小于其本底 $k_1 k_2 \mu_0 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}$, 故用 1 对互感线圈测量磁化率的相对误差较大。此时, 通过 2 对线圈反接串联构成半桥(见图 2), 从而扣除大部分本底。插入样品的次级线圈称为检测线圈, 另一次级空线圈为补偿线圈, 其反接串联的差分电动势输出为

$$\Delta \tilde{\epsilon}_2 = k_1 k_2 \mu_0 \tilde{\chi} \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}, \quad (6)$$

则

$$\tilde{\chi} = \frac{\Delta \tilde{\epsilon}_2}{k_1 k_2 \mu_0 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}}, \quad (7)$$

差分电动势 $\Delta \tilde{\epsilon}_2$ 与样品的交流磁化率 $\tilde{\chi}$ 成正比。



1. 配循环制冷机或液氮 2. 真空罩 3. 冷指 4. 热敏电阻(PT100)温度计 5. 加热器 6. 线圈 7. 带聚焦磁极的电磁铁 8. 特斯拉计

图 2 低温交流磁化率实验装置示意图

用锁相放大器测量反接串联次级线圈的输出电压。由于锁相放大器的输入阻抗($\sim 10 \text{ M}\Omega$)远高于半桥次级线圈组的最大输出阻抗,该输出电压信号可近似等于输出电动势,即

$$\tilde{\Delta\varepsilon}_2 \cong \Delta\tilde{V}_2 = V_2 \exp [i(\omega t + \theta)], \quad (8)$$

其中, θ 为锁相放大器测得相对于参考信号的相位差。

$$\tilde{\chi} = \frac{1}{k_1 k_2 \mu_0 \omega I_1} \exp \left[i \left(\omega t + \theta - \theta_I + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (9)$$

其中, θ_I 为初级线圈的输出电流 I_1 相对于参考信号的相位差。

对于超导样品,当发生超导转变时,样品的磁化率实部 χ' 从 0 变为 -1,会导致差分信号的变化,使幅值的绝对值增加。

以上原理是针对完全理想(幅值与相位都对称)的线圈和理想的环境。实际上,出于低成本导热需要,线圈安放在表面镀金的紫铜孔内。交流磁场会在导电良好的紫铜上感应出涡流,反过来屏蔽该交流磁场,对磁化率的测量造成负面影响,也使磁化率实部和虚部的分离变得困难。涡流对磁化率测量的影响不在本文讨论范围。

1.2.2 线圈结构

实验装置的交流互感线圈由人工绕制,将约 72 匝的初级线圈绕制在约 66 匝的次级线圈上,初级线圈的线径为 0.2 mm,次级线圈的线径为 0.1 mm。考虑到对温度的不敏感性要求,线材采用 6J12 锰铜漆包线,绕制后初级线圈在室温下的电阻约为 23Ω ,电感约为 $10 \mu\text{H}$,次级线圈在室温下的电阻约为 60Ω ,电感约为 $7.7 \mu\text{H}$ 。线圈骨架材料为亚克力,尺寸如图 3 所示。

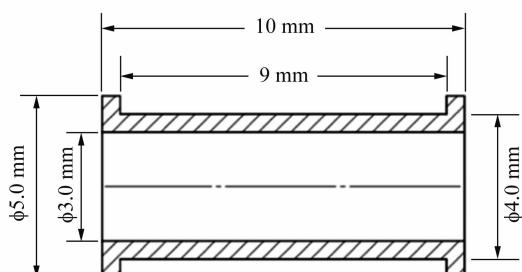


图 3 线圈骨架结构图

1.2.3 样品温度

考虑到外加磁场和成本因素,将东方晨景科技公司制造的低温霍尔效应测量系统改造为高温超导电磁性质教学实验装置。该装置包括低温系

统、磁场系统和测量系统。低温系统选择了微型制冷机(CTI),可提供 55~320 K 的温度区间。

厂家提供的冷指用紫铜棒制备,表面镀金,如图 4 所示。对于交流磁化率测量,一方面,样品与冷指之间隔着导热不良的线圈骨架,在相同的传热功率(等效于样品的变温速率)下,热阻越大温差越大;另一方面,初级线圈会生产焦尔热(与通过初级线圈的电流平方成正比)。这使样品温度与冷指温度相差很大。由于教学实验有课堂时间的限制,测量过程中升、降温速率不宜过慢。为了测量到准确的样品温度,用导热但是不导电的石墨带将薄膜型铂电阻传感器 PT1000 紧贴样品包裹起来,一起插入检测线圈内。用数字万用表(RIGOL DM3058E)测量 PT1000 的电阻值。测量结果如图 5 所示(数据取自 2016 级莫俭峰等同学的实验报告),经过转变点附近的平均升温速率为 0.98 K/min (控温点)和 2.66 K/min (样品旁),转变点附近的平均降温速率为 -3.11 K/min (控温点)和 -3.40 K/min (样品旁)。

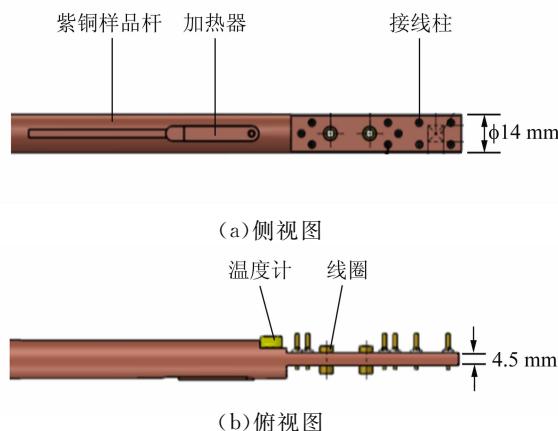


图 4 循环制冷机上的冷指恒温块设计图

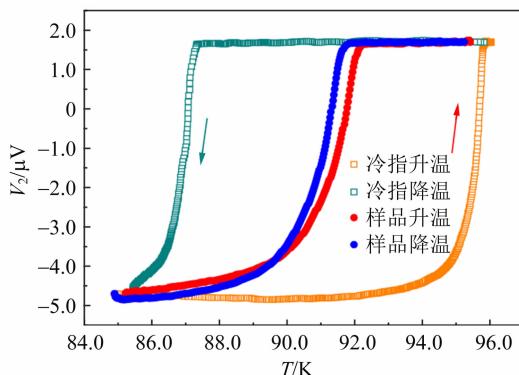


图 5 样品温度与冷指温度、交流磁化率的升温和降温测量

可见,超导转变点的测量值升温和降温差异接近 10 K,而样品旁的温度读数差约为 0.5 K. 测量结果验证了石墨导热带和 PT1000 对交流磁化率测量的影响可以忽略.

1.3 通用仪器

低温系统的控温仪(TC-202)由厂家提供. 磁场系统采用 EM3 电磁铁和直流电源(P10-40),最高磁感应强度可达 0.45 T. 磁场系统已自带通讯接口和基于 LabVIEW 的控制软件,提供仪器面板操作及计算机界面操作和数据记录. 交流磁化率数据采集系统采用通用仪器,包括测量样品温度的数字多用表(DM3058E)和测量次级线圈输出电压的锁相放大器(OE1022);压控电流源(OE4201)的控制电压由锁相放大器内置信号源提供. 除进行仪器面板的手动操作外,通过编辑 LabVIEW 程序,可将 2 台数据采集仪器界面融合到低温系统和磁场系统中.

学生按自己的实验方案选择仪器设备,并操作连接和选择仪器参量;教师帮助学生理解实验系统的结构和实验物理过程的逻辑关系,锻炼和培养学生实施实验方案的能力.

2 教学方法及效果

2.1 教学内容与课程安排

尽管在“电动力学”和“固体物理学”中涉及到超导电性的知识,但是物理专业学生在本科阶段并没有系统地学习超导电性理论,这恰好为“通过实验学习知识”的研究型实验教学提供了广阔的空间. 在实验技术上,为低年级学生安排的相关实验有:温度传感器实验、磁场测量、不良导体热传导率测量、TEC 半导体制冷实验、低温热辐射实验、真空实验、锁相放大器与弱信号测量实验.“高温超导体电磁性质研究”实验安排在近代物理实验Ⅱ,包含 2 部分研究内容,分别为交流磁化率和电阻测量不同外磁场强度下的超导转变. 在实验讲义上附有较详细的超导知识介绍,提供若干个可选的研究问题,如外磁场对超导转变的影响(必做),交流磁场频率、振幅对超导转变的影响,探索高温超导体的超导态是否为热力学态,即是否与先降温后加场还是先加场后降温到达超导态的路径有关. 讲义提供相关参考文献,供学生实验前调研预习,教师鼓励学生提出自己感兴趣的学术问题或技术问题.

本实验共安排 16 课时,其中前 8 课时用于学生熟悉实验装置和相关操作,学习低温技术和电磁测量技术,测量本底;然后至少间隔 1 周后学生再做实验. 在间隔时间内,学生做调研,并针对选择要研究的问题提出实验方案,教师在实验前检查实验方案,对学生实验方案明显不合理之处提出修改意见. 第二阶段(后 8 课时)学生侧重从实验中观察的超导现象入手深入学习超导知识,训练多参量系统的实验研究.

每次实验 4 名学生 1 组,2 人合作测量交流磁化率,另 2 人合作测量电阻. 组队原则是学生自愿,指导教师提供分工建议但不强求:首先组员通过讨论后选择或提出待研究的问题;然后 1 名同学侧重文献调研,另 1 名同学侧重制定实验方案;鼓励但不要求一名同学按另一名同学制定的实验方案开展实验和数据记录,以训练团队合作;2 名同学共享实验数据,独立分析数据,并完成实验报告(受疫情影响,2017 级学生第一阶段的准备时间只有 4 课时,组员合作完成 1 份实验报告). 平时考核共 80 分:原理与实验方案 30 分,实验操作与记录(含现场提问)20 分,数据处理、分析与呈现 30 分. 要求在实验报告中标注组员的贡献,同时教师通过观察组员现场操作以及回答现场提问来判断组员的水平与贡献. 对于学生自己提出的、有意义的实验方案,即使条件不允许实施,教师也可以给方案部分满分.

2.2 学生实验范例

从实验方案、实验操作、数据记录、数据分析和讨论及实验结论来考查学生的学习效果,学生都可以完成电阻或抗磁性转变的测量,并至少在 2 个不同磁场强度的磁场下探究磁场对超导转变的影响. 但能按时完成全部实验操作的学生很少,这与学生想获得更多数据及低温实验本身耗时长有关,也可能与实验方案不细致或实验操作不当有关. 以下介绍几例有代表性的实验结果.

2.2.1 样品位置的磁场定标

磁场系统提供特斯拉计实时测量磁场强度,并通过“磁场模式”控制测量点的磁场强度. 特斯拉计只能放在真空罩的外面,位处冷指的样品附近没有磁场传感器,离特斯拉计有至少 1 cm 的距离. 电磁铁磁隙口存在非均匀的磁场分布,样品位置的磁场强度获得要求校正其与特斯拉计位置的磁场强度关系. 磁场强度标定的前提是真空

罩(无磁不锈钢)和防热辐射屏(镀金紫铜)为非磁性材料,不影响直流磁场的空间分布。

磁场强度校正是选做实验内容,步骤为:用磁铁电源向电磁铁提供稳恒直流电流,使电磁铁磁隙处磁场分布稳定;然后分别测量样品位置和特斯拉计位置的场强;再改变电流,重复测量。校正结果如图6所示(数据取自2016级莫俭峰等同学的实验报告),可见样品处磁场强度略低于特斯拉计位置的磁场强度。

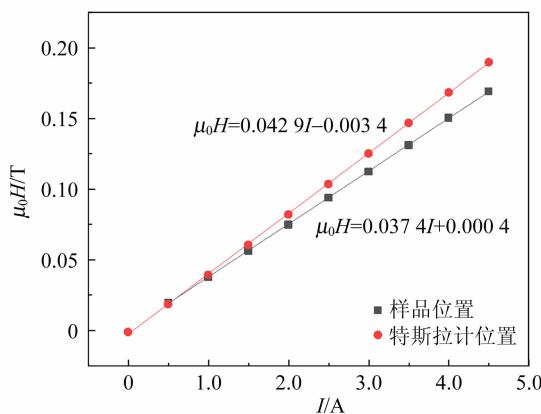


图6 样品位置的场强与特斯拉计位置的场强

2.2.2 交流磁化率测量抗磁性及外磁场的影响

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超导陶瓷样品的超导转变温度和幅度对外加磁场比较敏感,如图7所示(数据取自2016级胡依森、朱融同学的实验报告),特别是开始加场时。与约化温度2次方的关系(见图8)表明,在接近超导转变温度时,超导体处于磁通液态(涡旋液态)^[9]。

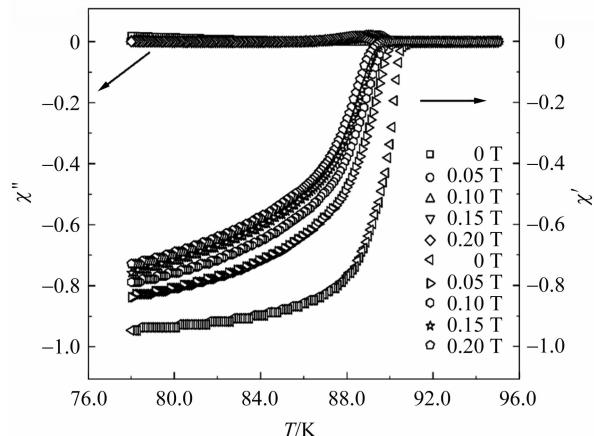


图7 外加磁场对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超导陶瓷样品的超导转变的影响

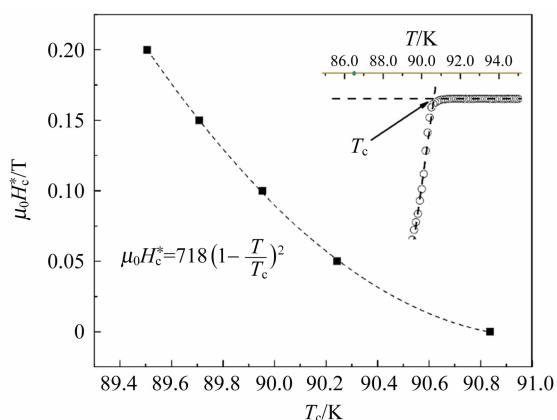


图8 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超导陶瓷样品的有效临界磁场强度与临界温度的关系

然而,如果采用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超导织构样品,由于织构生长减少了晶粒之间的超导弱连接以及晶粒内部磁通钉扎中心的引入,涡旋液态消失,超导转变对外加场不敏感(有对照实验结果支持),一定程度上影响教学演示效果。无论如何,在教学过程中要向学生明确,所观察到的现象并非 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导体的临界磁场所致。

2.2.3 频率对超导抗磁性测量的影响

在9 Hz~9.96 kHz范围内,频率对超导转变温度几乎没有影响,但对转变幅值(即抗磁性)有很大影响,如图9所示(数据取自2018级赖丽敏、庄伽同学的实验报告)。式(9)显示次级线圈的输出电压与频率约化值(V_2/ω)应不随频率而变,实验中,抗磁性随频率增加而减小,之后趋于饱和,此现象与感应涡流所导致的现象相符,不能被当作超导性质讨论,相关分析将另述。

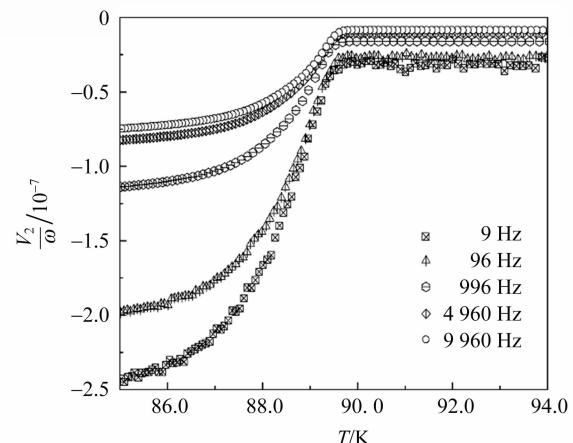


图9 频率对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超导陶瓷样品的超导转变的影响

2.3 教学效果

自 2019 年以来,共有 284 名学生完成该实验的学习。该实验难度较大,根据课程调查问卷,50%以上的学生实验预习时间在 5 h 以上,约 50% 的学生能在既定学时内完成全部实验内容,学生完成实验报告的时间普遍在 3~4 h。70% 以上的学生产生了兴趣,初步了解怎样通过实验研究物理问题,学会了用实验回答科学问题和技术问题。

3 结束语

基于从实验中学习的理念,设计了高温超导陶瓷材料交流磁化率实验,探索外加磁场对超导转变温度的影响,在巩固热学、电磁学、真空技术、弱信号测量(锁相放大器)技术等知识的基础上,学习超导电性相关知识。通过优化样品温度的测量方案,在保证测量精度的基础上,有效缩短了控温时间,使学生可以在有限时间内做更多深入的探索研究,教学实践取得了良好效果。

参考文献:

[1] 吴思诚,王祖铨. 近代物理实验[M]. 2 版. 北京大

学出版社,1995:418-425.

- [2] 黎启业,杜仲廉,陈树森,等. 高 T_c YBaCuO 超导体——应用于物理实验教学的一个装置[J]. 物理实验,1988,8(1):32-34.
- [3] 华波,汪人甫,姚红英. 改进实验仪器测量 Bi/Ag 线材的超导转变温度[J]. 大学物理实验,2010,23(4):4-5.
- [4] 裴朝,崔益民,李华,等. 提高锁相放大器测量交流磁化率精度的方法[J]. 物理实验,2010,30(11):38-40.
- [5] 王三胜,褚向华,宁晓帅,等. 超导体电输运及交流磁化率双模式测量系统研制[J]. 超导技术,2013,41(4):50-54.
- [6] 丁世英. 超导电性的交流磁化率研究[J]. 物理学进展,2009,29(3):239-273.
- [7] 孙敬姝,李志有,梁浩,等. 将科研成果及时转化成演示实验教学的实践[J]. 物理实验,2003,23(5):30-36.
- [8] 赵红昆,杨恩翠,刘忠义,等. 超导量子干涉仪磁强计在本科实验教学中的应用[J]. 实验室科学,2017,20(3):196-202.
- [9] Szymczak R, Karkin A E, Baran M, et al. Reversible magnetization of radiation-disordered $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ single crystals [J]. Physical Review B, 1994, 50(13):9463-9469.

AC diamagnetism experiment of a high temperature superconductor

HE Zhen-hui¹, LIU Yan-fen¹, ZHAO Fang²

(1. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Electromagnetic properties of a high temperature superconducting ceramic could be a good candidate of learning superconductivity through experiments for undergraduate students in physics. The vacuum technology, low temperature technology, thermology, electromagnetism were involved in the superconducting experiment, and so on. And thus the students' ability to explore new knowledge was enhanced by learning new knowledge from experiments and consolidating the previous knowledge by means of application. In the design of the experimental project, the relevant knowledge points were unraveled, the corresponding experimental device module was set up, and the explored problems were provided as well. Taking $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ sintered ceramic samples as example, the AC susceptibility characterization of the superconductivity diamagnetism and the influence of an applied DC magnetic field on the superconducting transition were discussed, including the design and improvement of the experimental setup and the experimental teaching experience.

Key words: superconductivity; transition temperature; AC susceptibility; magnetic field

[责任编辑:任德香]