

极端条件下物质磁性的原位测量

黄晓丽 王鑫 刘明坤 梁永福 刘冰冰 崔田

*In-situ* magnetic measurements of substances under extreme conditions

Huang Xiao-Li Wang Xin Liu Ming-Kun Liang Yong-Fu Liu Bing-Bing Cui Tian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 037403 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.037403

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.037403>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压调控的磁性量子临界点和非常规超导电性

Pressure-tuned magnetic quantum critical point and unconventional superconductivity

物理学报.2017, 66(3): 037401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.037401>

磁热效应材料的研究进展

Research progress in magnetocaloric effect materials

物理学报.2016, 65(21): 217502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.217502>

$\text{Dy}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  磁热性质研究

Study on the magnetic and magnetocaloric effects of  $\text{Dy}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

物理学报.2015, 64(17): 177502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177502>

$\text{Li}_2\text{C}_2$  中电声耦合及超导电性的第一性原理计算研究

First-principles study of electron-phonon coupling and superconductivity in compound  $\text{Li}_2\text{C}_2$

物理学报.2015, 64(21): 214701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.214701>

铁基超导体  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  表面隧道谱的研究

Investigation of scanning tunneling spectra on iron-based superconductor  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$

物理学报.2015, 64(9): 097401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097401>

## 专题: 高压下物质的新结构与新性质研究进展

## 极端条件下物质磁性的原位测量\*

黄晓丽 王鑫 刘明坤 梁永福 刘冰冰 崔田†

(吉林大学物理学院, 超硬材料国家重点实验室, 长春 130012)

(2016年12月26日收到; 2017年1月13日收到修改稿)

温度和压力均是决定物质存在状态的基本热力学要素. 低温和高压是现代科学实验最重要的极端条件, 为物理、化学、材料和生物等多学科研究提供了新途径, 对于发现和认识新现象、揭示新规律具有重要作用. 极端条件下物质的磁性研究是极端条件研究的重要分支, 不仅给出了物质在极端条件下的磁性变化, 而且是研究高温超导体的重要手段. 本文阐述了高压下物质磁化率和超导转变温度测量的原理和方法, 并简要介绍了设计、搭建的低温高压下物质磁性原位测量系统. 利用此系统测量了铁在高压下的磁性转变以及钇钡铜氧样品在高压下的超导转变温度.

**关键词:** 极端条件, 超导电性, 交流磁化率

**PACS:** 74.25.Dw, 74.62.Fj, 75.30.Sg, 74.40.Kb

**DOI:** 10.7498/aps.66.037403

## 1 引言

极端条件是指人们日常生活中并不存在、并且用通常的手段难以实现的某些物理条件, 如极低温、超高压和强磁场等. 在传统科学日臻完善的今天, 为了能制造出更多的机遇以取得新的研究突破, 非常规的极端实验条件显得越来越重要. 通过拓宽实验条件, 使物质处于极端条件, 实验人员发现了许多常规条件下无法得到的新现象和新规律. 极端条件的产生需要特殊设计的装置, 几乎是目前技术的极限, 在使用时有较多的限制, 因此现有的很多物性测量设备无法在极端条件研究上使用. 因此, 发展极端条件下的实验手段、实现极端条件下的物性测量具有重要的意义, 同时也极富挑战.

超导电性的研究一直是凝聚态物理领域的热点方向之一. 自从1911年昂内斯等首先发现超导电性以来, 就为物理学开辟了一个新的领域, 寻找高温超导体成为物理与材料领域的热点课题. 迄今

为止, 人们在发现新材料和探索超导机理方面做出了巨大的努力, 也取得了丰硕的成果. 100多年来, 超导材料的探索历程经历了四个重要阶段. 第一阶段, 1986年发现了超导转变温度( $T_c$ )高于30 K的铜氧化物超导体<sup>[1]</sup>, 之后在高压下达到164 K<sup>[2]</sup>, 创造了高温超导纪录, 实现了液氮温区(77 K)超导体的梦想. 第二阶段, 2001年在简单层状结构MgB<sub>2</sub>中发现其超导转变温度为39 K<sup>[3]</sup>, 深入研究发现其是电子-声子相互作用驱动的传统Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理论超导体, 打破了前人提出的传统超导体麦克米兰极限(30 K). 第三阶段, 2008年发现的铁基超导体<sup>[4]</sup>, 最高超导转变温度为56 K<sup>[5]</sup>, 尽管比铜氧化物超导体的最高 $T_c$ 低, 但是颠覆了磁性离子(Fe离子)对超导不利的观点, 为探索新的超导体开阔了思路. 第四阶段, 最近在高压下发现新型硫氢化合物H<sub>3</sub>S, 其最高超导转变温度达到203 K(-70 °C)<sup>[6,7]</sup>, 打破了此前铜基超导体164 K的温度纪录, 与MgB<sub>2</sub>一样是传统BCS理论超导体, 为获得室温超导体迈出了坚实的一步. 高

\* 国家自然科学基金(批准号: 11504127, 51572108, 51632002, 11634004, 11274137, 11474127)、教育部长江学者和创新团队发展计划(批准号: IRT\_15R23)、国家自然科学基金国家基础科学人才培养基金(批准号: J1103202)和中国博士后科学基金(批准号: 2015M570265)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [cuitian@jlu.edu.cn](mailto:cuitian@jlu.edu.cn)

温超导体  $H_3S$  的发现进一步推动了高温超导研究的热潮, 尤其是高压这一极端条件对超导电性的积极影响, 已被广泛应用于超导材料的研究中. 零电阻和完全抗磁性是超导体的两个相互独立又紧密联系的基本的特征, 只有这两个特性同时具备才是真正的超导体, 二者缺一不可. 因此在压致超导实验中, 测量样品的完全抗磁性对于确定样品是否处于超导态具有极其关键的作用.

除了测量物质的超导完全抗磁性之外, 极端条件下物质的磁性变化也是重要研究内容. 磁性是物质的本征属性, 从微观粒子到宇宙天体, 都具有某种程度的磁性. 在常规条件下, 磁性测量的手段发展比较成熟, 测量可靠性和灵敏度较高, 可测量的磁性参量和对象极其丰富. 但是在低温、高压综合极端条件下, 受到实验装置和样品尺寸的限制, 绝大多数的常规磁性测量手段无法使用. 目前对于低温高压下物质的磁性测量主要是利用感应线圈对磁化样品的磁通量的变化进行测量, 根据磁通量发生变化的途径又分为交流磁性测量和直流磁性测量. 交流磁性测量中, 样品和感应线圈均固定在一个交变的磁场中, 交变磁场导致磁通量随时间发生变化, 感应线圈两端会产生一个与交变磁场频率和样品交流磁化率相关的电动势; 而直流磁性测量是在样品附近施加一个直流恒定场, 磁化的样品相对感应线圈振动, 导致感应线圈两端产生一个与振动频率和样品磁化强度相关的电动势. 目前, 在极端条件下, 对样品的磁性进行测量主要有以下两种方法: 超导量子干涉磁强计 (SQUID) 测量灵敏度可达到  $10^9$  emu, 商业化的 SQUID 产品既可以进行直流磁性测量, 也能进行交流磁性测量, 但是由于 SQUID 的样品腔比较小, 限制了高压产生装置的尺寸, 因此目前常用的基于 SQUID 的高压产生装置加载在样品上的压力不高于 13 GPa [8,9]; 另一种常见的测量方法是在常用的高压产生装置金刚石对顶砧 (diamond anvil cell) 内部布置互感线圈 (互感法), 对样品的交流磁化率进行测量 [10–18], 虽然测量灵敏度较 SQUID 低 2–3 个数量级, 但是可对样品施加 100 GPa 以上的超高压实验条件 [13], 能够进行低温高压下物质磁性的原位测量, 并获得了极端条件下材料的磁性参数 [17,18] 以及超导材料的超导转变温度 [10–16].

但是, 在百万大气压高压实验中, 受到微小样

品尺寸的限制, 这就导致互感法测量得到的信号往往被淹没在背底噪声中, 给测量带来极大的困难. 本文简要介绍高压下交流磁化率以及低温下超导转变温度的测量原理和基本方法, 并介绍一种低温高压综合极端条件磁性原位测量系统, 以及利用该系统测量得到的磁性转变和超导转变温度结果.

## 2 测量原理

利用互感法进行交流磁化率的测量的原理是基于法拉第电磁感应定律,

$$E = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d(BS)}{dt}, \quad (1)$$

其中  $\varphi$  为回路磁通量,  $B$  为回路磁感应强度,  $S$  为回路面积. 法拉第电磁感应定律表明变化的磁通量会产生感应电动势. 如图 1 (a) 所示, 当为激励线圈提供一个交变电流时, 在激励线圈内部会产生一个交变的磁场  $H_{ac}$ , 处在  $H_{ac}$  中的样品被磁化后的磁感应强度  $B$  与样品的磁化率  $\chi$  有关, 显然  $B$  是随时间变化的, 这就会在感应线圈两端产生一个感应电动势  $E$ , 通过测量  $E$  便可得到样品的磁化率信息. 值得注意的是, 交变磁场  $H_{ac}$  同样会在感应线圈两端产生感应电动势  $E'$ ,  $E'$  一般是  $E$  的  $10^4$  倍以上,  $E'$  是不希望被测量到的噪声信号, 从如此大的噪声信号中分辨出  $E$  几乎是不可能的. 通常的解决方法如图 1 (b) 所示, 在激励线圈内放置一个补偿线圈, 该线圈两端会因为交变磁场产生感应电动势  $E''$ . 将感应线圈和补偿线圈串联反接,  $E'$  和  $E''$  相互抵消. 线圈绕制参数的一致性以及感应线圈和补偿线圈在激励线圈中的对称性都会对抵消效果造成影响, 因此总会有无法抵消掉的残余噪声存在. 一般还在回路中加入一个微调线圈, 进一步抵消噪声. 此时整个回路输出电动势  $\varepsilon$  是非常微弱的, 一般在 nV 量级, 通常使用锁相放大器对  $\varepsilon$  的幅值进行测量.

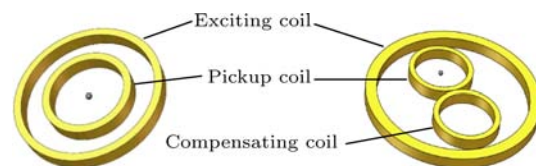


图1 (a) 互感法单线圈结构; (b) 互感法典型双线圈结构  
Fig. 1. The inductive method of (a) one coil structure and (b) two coil structures.

对于体积为  $v$ , 磁化率为  $\chi$  的样品, 通过锁相放大器测量到的信号幅值

$$V \propto \frac{fkniN\chi v}{D}, \quad (2)$$

其中,  $f, i$  分别是交变激励电流的频率和幅值;  $n, k$  分别是激励线圈的匝密度和层数;  $N$  是感应线圈的匝数;  $D$  是激励线圈的内径. 由此方法测量得到的磁化率  $\chi$  是交流磁化率. 在测量中,  $f, k, n, i, N, v, D$  都是常数, 即  $\chi$  与  $V$  是成正比的, 可以通过测量得到的  $V$  的变化趋势得到  $\chi$  的变化趋势. 但是通过  $V$  对  $\chi$  进行绝对测量是无法实现的, 此方法仅能进行相对测量.

### 2.1 样品磁化曲线的测量

当在交变磁场上叠加一个直流磁场  $H_{dc}$  时, 此时测量得到的交流磁化率是增量交流磁化率  $\chi_{inc} = \Delta M / \Delta H$ , 增量交流磁化率与直流磁场  $H_{dc}$  和叠加在其上的交变磁场  $H_{ac}$  有关. 如果交变磁场相比于直流磁场足够小, 那么可以认为增量磁化率只与直流磁场有关, 即

$$\chi_{inc}^{(H_{dc})} = \lim_{H_{ac}/H_{dc} \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta H}. \quad (3)$$

对 (3) 式进行积分, 可得到在直流磁场为  $H$  时样品的磁化强度:

$$M(H) = \int_{H_0}^H \chi_{inc}^{(H_{ac})} dH + M(H_0). \quad (4)$$

因为  $\chi$  仅能通过相对测量得到其变化趋势, 因此样品的磁化强度也是相对测量, 仅能表示样品的磁化强度随直流磁场的变化趋势, 即样品的磁化曲线.

### 2.2 超导体的完全抗磁性测量

根据超导体在临界温度以下完全抗磁性 (Meissner 效应) 的特点, 利用互感法测量样品的交流磁化率的实部随温度的变化, 实部发生突变时的温度即为超导转变温度. 交流磁化率的实部反映的是材料转变为超导体时对交流磁场的屏蔽量, 当材料进入超导态后, 材料不允许磁场存在于其体内, 磁场立即被排除. 因此, 材料从正常态转变为超导态相当于交流磁化率的实部发生 0 到  $-1$  的突变, 突变时对应的温度就是超导体的转变温度. 目前对高压下材料发生超导转变时交流磁化率实部的突变进行测量的方法主要由以下两种.

#### 1) 互感测量法

此方式是通过互感线圈直接对样品的交流磁化率随温度的变化进行测量, 该方法的原理如图 2 所示<sup>[19]</sup>, 使用锁相放大器的内部振荡器所输出的电压去驱动激励线圈, 感应线圈和补偿线圈的输出电压首先通过一个前置放大器, 然后再由锁相放大器进行测量. 此方法结构简单, 易于使用, 在灵敏度范围内可对任意样品的超导转变温度进行测量. 但是该方法对感应线圈和补偿线圈绕制参数的一致性要求非常高, 因为没有室温调节线圈, 需要测量的背景噪声很小才能使锁相放大器工作在最佳状态. 该方法一般使用较长的锁相放大器时间常数 (5—10 s) 以减小测量噪声, 所以测量时的控温速率一般在 0.1—0.5 K/min.

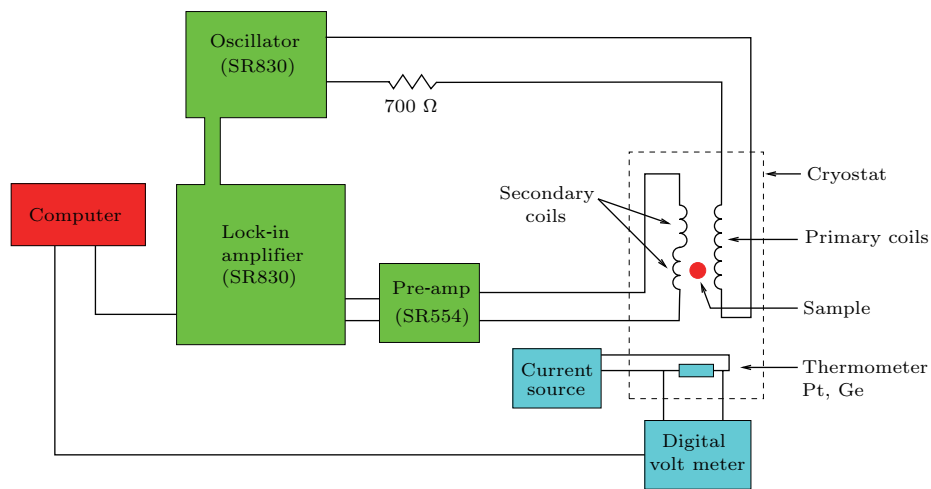


图 2 互感法测量超导材料的超导转变温度原理图<sup>[19]</sup>

Fig. 2. The principle of the superconducting temperature measured by the inductive method<sup>[19]</sup>.

2) 低频磁场调制法

Struzhkin 等 [14,15] 提出了一种使用低频调制磁场降低测量时背景噪声的方法, 使用这种方法对高压下样品的交流磁化率进行测量可以消除在温度变化时的背景噪声, 提高整个测量系统的分辨率. 其基本原理是, 当外加磁场大于临界磁场时, 样品超导态会被破坏, 转变为正常态, 即交流磁化率由 -1 变为 0. 临界磁场和温度存在以下关系:

$$H_c = H_0 \left(1 - T/T_c\right)^2, \quad (5)$$

其中  $H_c$  为温度  $T$  时的临界磁场,  $H_0$  为温度为 0 K 时的临界磁场.

如图 3 所示, 在激励线圈 3、感应线圈 1、补偿线圈 2 外部加入一个调制线圈 4, 调制线圈由 22 Hz 的低频正弦波信号进行驱动. 如图 4 所示, 样品处于超导态时, 当调制线圈产生的磁场小于临界磁场, 样品仍然处于超导态, 但是当磁场大于临界磁场, 样品超导态被破坏, 变为正常态. 这种转变仅与磁场的大小有关而与磁场的方向无关, 因此反向磁场同样会发生以上转变. 可以看出, 在调制线圈产生的一个磁场周期中, 被测样品发生了两次交流磁化率由 0 到 -1 的周期性转变. 然后可以通过一个额外的锁相放大器锁定驱动线圈磁场频率的二倍频, 在临界温度附近会产生一个突变的信号. 低频磁场仅仅对处于超导态的样品有调制作用, 周围环境并不会对低频磁场做出响应, 从而可减小背景噪声. 图 5 为在同一测量过程中分别使用互感测量法和低频磁场调制法对 YBCO 样品的测量结果. 该方法虽然能够有效减小背景噪声, 但是如果所测样品

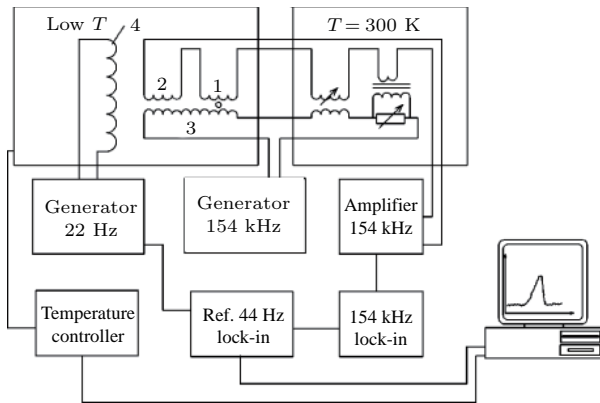


图 3 低频磁场调制的互感法测量超导材料的超导转变温度原理图 [15]

Fig. 3. The principle of the superconducting temperature measured by the low frequency magnetic field modulation method [15].

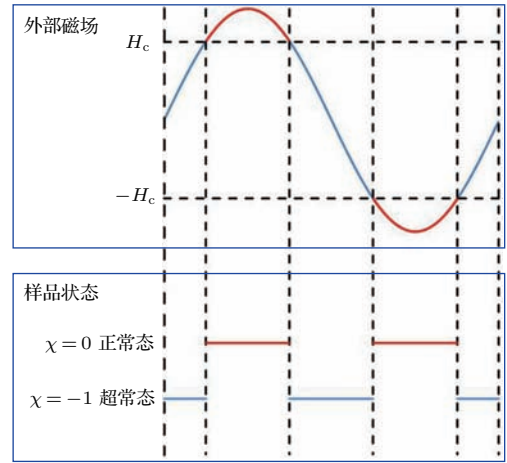


图 4 外部磁场对样品超导状态进行调制的示意图  
Fig. 4. The schematic view of the superconducting state of the sample modulated by the external magnetic field.

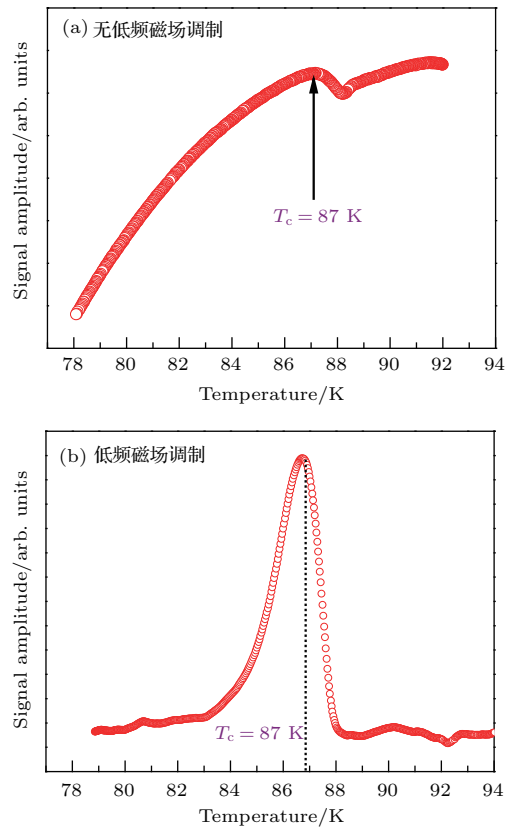


图 5 (a) 无低频磁场调制情况下, 互感测量法测量得到的升温过程中 YBCO 样品交流磁化率随温度的变化; (b) 有低频磁场调制情况下, 升温过程中 YBCO 样品交流磁化率被调制后所产生的突变信号

Fig. 5. (a) Without low frequency magnetic field modulation, the alternating current (ac) magnetic susceptibility change of the YBCO sample during the increasing temperature process by the inductive method; (b) with a low frequency magnetic field modulation, the temperature dependence of the ac magnetic susceptibility change with increasing temperature.

的临界磁场较大,会发生低频磁场无法对超导样品进行调制的现象,此时锁定低频磁场的锁相放大器不会有突变信号产生.

### 3 测量系统简介

我们通过分析现有高压下磁性测量技术,设计并搭建了高灵敏度、高稳定性的原位高压磁性测量系统,该系统基于金刚石对顶砧,能够给样品提供高压、低温等极端条件,可以对极端条件下样品的交流磁化率、磁化曲线、超导转变温度等参数进行测量,系统提供了互感测量法和低频磁场调制法两种测量超导转变温度的方法.最近,我们利用该系统已经完成了 $\text{H}_3\text{S}$ 超导 Meissner 效应的实验验证,发现在压力为 149 GPa 时,超导转变温度为 183 K<sup>[20]</sup>.

基于金刚石对顶砧的高压下磁性测量系统的框架详图如图 6 所示.高频交流电流源(5)驱动激励线圈(3),在激励线圈内部产生一个交变的磁场,同时高频激励电流源也为室温微调线圈组(6)提供驱动电流.感应线圈(2)中包含样品(4)并与补偿线圈(3)和室温微调线圈组串联,输出的电压信号首先进行阻抗匹配,然后经过前置放大器后被高频锁相放大器采集.激励线圈、感应线圈、补偿线圈被固定在金刚石对顶砧的压砧附近,对顶砧放置在低温恒温器(7)中,温度计和加热器(8)由控温仪进行控制,能够为样品提供恒定或可连续变化的低温环境.在进行低频磁场调制测量,在激励线圈外部放置一个调制线圈(9),调制线圈由一个低频交流电流源驱动(10),调制后的信号由低频锁相放大器进行采集.

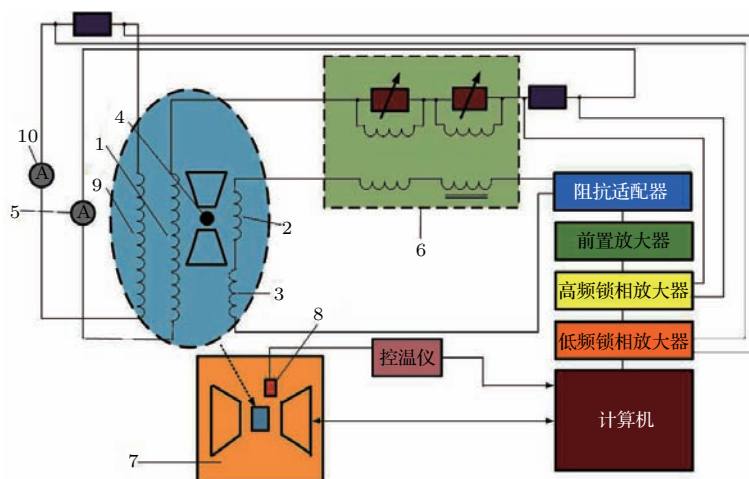


图 6 超导交流磁化率测试基本线路图,其中,1,激励线圈;2,感应线圈;3,补偿线圈;4,样品;5,高频交流电流源;6,调制线圈组;7,低温恒温器;8,温度计和加热器;9,调制磁场线圈;10,低频交流电流源

Fig. 6. The basic diagram of the superconducting ac magnetic susceptibility measurement. The main parts include: 1, exciting coil; 2, pickup coil; 3, compensating coil; 4, sample; 5, high frequency ac current source; 6, modulated coil assembly; 7, low temperature cryostat; 8, the thermometer and the heater; 9, the coil of the modulated magnetic field and 10, low frequency ac current source.

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 高压下铁的磁性测量

在常规条件下,铁、钴、镍以及铁的氧化物等呈现铁磁性的物质被认为是地球内部的主要组成成分,它们在地球内部以高压的状态存在.因此研究物质在高压下的磁性,能够认知地球内部物质的磁性状态,明确高压下结构相变与磁性转变之间的联系以及探索压制磁性转变机理.

理论计算和实验结果显示,铁在压力的作用下会发生 $\alpha$ 相(bcc结构) $\rightarrow$  $\epsilon$ 相变(hcp结构)的相变,

相变发生在 13 GPa 附近.穆斯堡尔谱<sup>[21]</sup>、磁性圆二色<sup>[22]</sup>、SQUID<sup>[23]</sup>测量铁在相变后的磁性的结果表明,该相变伴随着磁性的转变,但是对铁在相变后的磁性状态仍存在争议.我们使用搭建的原位高压磁性测量系统,对单质铁 Fe 在室温条件下磁性随压力的变化进行了测量,图 7 的测量结果显示,Fe 的结构相变 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 伴随着磁性的转变,而相变之后的 $\epsilon$ 相铁的磁化曲线形状未发生改变,说明相变后的铁并非是顺磁性的,但是初始磁化率和饱和磁化强度都降低了,铁磁性被削弱<sup>[24]</sup>.我们的结论与 SQUID 测量得到的结论相符.

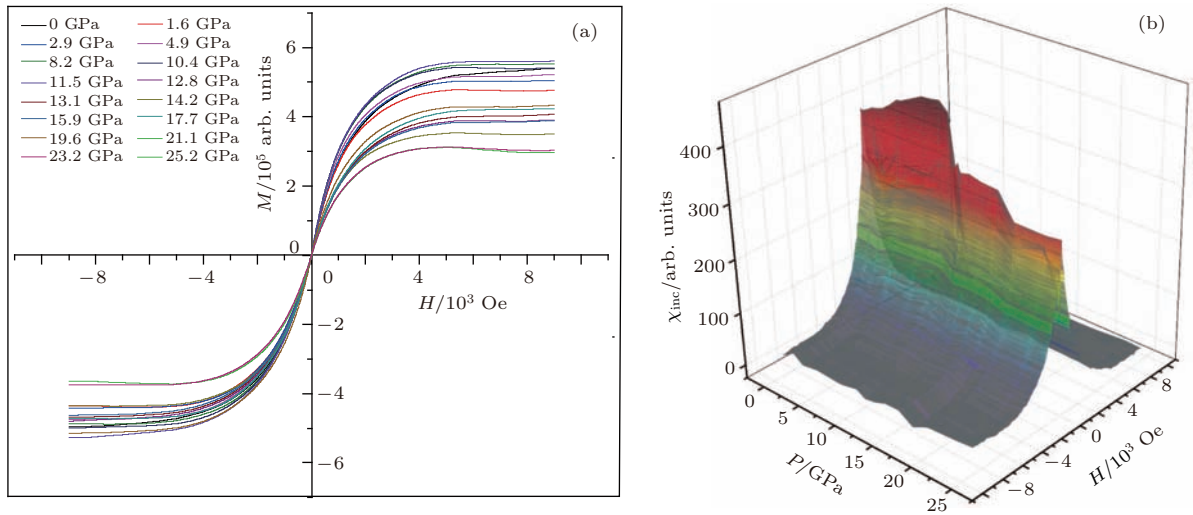


图7 (a) 不同压力下铁样品磁化曲线; (b) 铁样品的压力-直流磁场-增量磁化率三维图  
 Fig. 7. (a) The magnetization curves of iron sample at various pressures; (b) the three-dimensional image of pressure-direct current magnetic field-magnetic susceptibility in iron sample.

### 4.2 高压下钇钡铜氧超导Meissner效应测量

1987年3月, 阿拉巴马大学汉茨维尔分校的Wu等<sup>[25]</sup>发现了钇钡铜氧(YBCO)材料的超导临界转变温度超过93 K. YBCO是首个发现超导温度在77 K(液氮的沸点)以上的材料, 因此用相对便宜的液氮就可以对其降温冷却转变为超导体. 钇钡

铜氧系列高临界温度超导体的发现, 使人们对这类金属氧化物超导体产生了极大的兴趣及研究热情. 高压手段在超导材料的结构相变及超导转变温度方面起到了重要的调控作用. 下面我们将以高温超导体YBCO样品为例, 介绍利用我们自主搭建的超导交流磁化率测量系统测得样品的超导转变温度的实验结果.

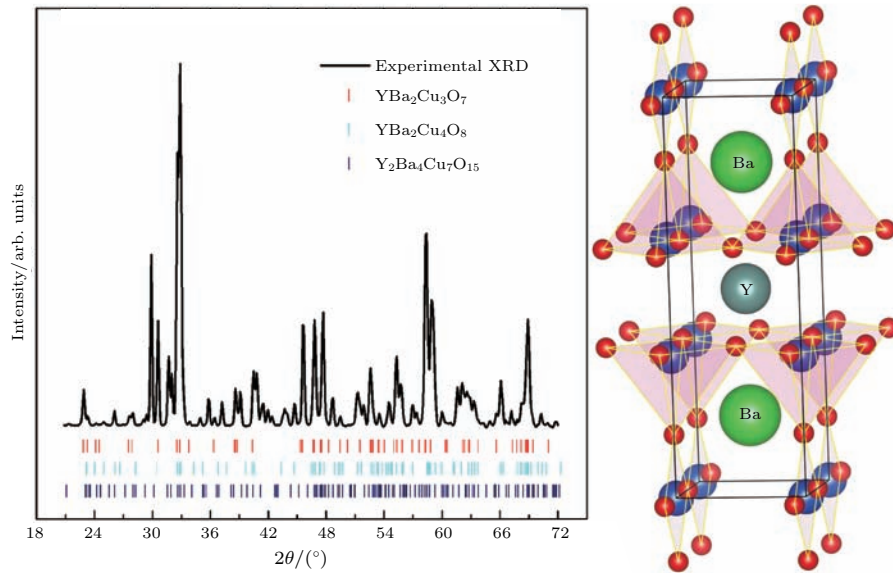


图8 (a) 待测钇钡铜氧样品的粉末衍射XRD谱, 入射X光波长为 $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$  (Cu靶); (b) 典型钇钡铜氧样品 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的晶体结构(空间群为 $PMMM$ )  
 Fig. 8. The X-ray diffraction pattern of the synthesized YBCO sample, and the incident X-ray is copper target with  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ; (b) the typical crystal structure of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  sample with space group  $PMMM$ .

参照前人合成YBCO样品的方法,我们自主合成了YBCO样品,并对其进行了粉末X射线衍射(XRD)测试(图8(a)),并与已知钇钡铜氧样品的晶体结构的XRD谱进行对比.得到合成的YBCO样品成分主要为 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (空间群为 $PMMM$ ),即123型铜基超导体,其晶体结构见图8(b).钇钡铜氧 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 样品为钙钛矿缺陷型层状结构,含有 $\text{CuO-CuO}_2\text{-CuO}_2\text{-CuO}$ 交替的层, $\text{CuO}_2$ 层可以有变形和褶皱.钇原子存在于 $\text{CuO}_2$ 和 $\text{CuO}_2$ 层中, $\text{BaO}$ 层则在 $\text{CuO}$ 与 $\text{CuO}_2$ 两层之间.

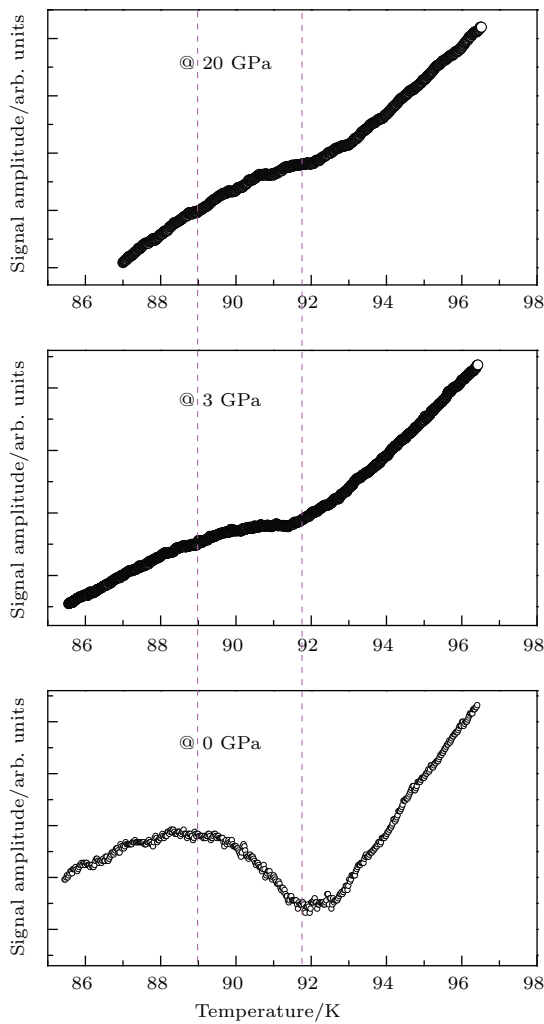


图9 不同压力下YBCO样品交流磁化率随温度的变化  
Fig. 9. The temperature dependence of ac magnetic susceptibility in YBCO sample at various pressures.

通过金刚石对顶砧装置产生压力,金刚石砧面大小为 $400\ \mu\text{m}$ ,封垫是无磁的铍片,预压至 $60\ \mu\text{m}$ 厚,样品腔直径为 $150\ \mu\text{m}$ .图9给出了不同压力下YBCO样品交流磁化率随温度的变化,最高压力20 GPa.随着压力的升高,样品越来越薄,直接影响了样品在发生超导转变时磁化率的变化

量.不过,超导转变温度并未随压力发生较大变化:0 GPa时,超导转变温度为89 K;20 GPa时,超导转变温度仍为89 K.

## 5 结论与展望

本文主要介绍了高压下交流磁化率的测量原理、方法,并对搭建的低温高压磁性原位测量系统进行了简要的介绍,该系统可以对高压下样品的交流磁化率等磁性参数以及超导材料的超导临界温度进行测量,尤为重要是对高压下超导材料的超导 Meissner 效应进行实验验证.

关于物质在极低温、超高压二维极端条件下物质的磁性及超导电性等物理性质的研究是高压科学中比较前沿的研究领域,而极端条件下的原位测量技术是开展研究的先决条件.目前现有的高压下原位磁性测量技术已经远远落后于高压产生技术,无法满足更进一步的极端条件下磁性研究的要求.因此,在改良现有技术手段、提高测量灵敏度的同时,更需要拓展思路,建立和探索更加灵敏、可靠的极端条件下磁性测量的方法和手段<sup>[26]</sup>,以拓展高压磁性研究的深度和广度.

## 参考文献

- [1] Bednorz J G, Müller K A 1986 *Z. Physik B* **64** 189
- [2] Gao L, Xue Y Y, Chen F, Xiong Q, Meng R L, Ramirez D, Chu C W, Eggert J H, Mao H K 1994 *Phys. Rev. B* **50** 4260
- [3] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zenitani Y, Akimitsu J 2001 *Nature* **410** 63
- [4] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, Hosono H 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 3296
- [5] Wu G, Xie Y L, Chen H, Zhong M, Liu R H, Shi B C, Li Q J, Wang X F, Wu T, Yan Y J, Ying J J, Chen X H 2009 *J. Phys.-Condens. Matter* **21** 142203
- [6] Duan D, Liu Y, Tian F, Li D, Huang X, Zhao Z, Yu H, Liu B, Tian W, Cui T 2014 *Sci. Rep.* **4** 6968
- [7] Drozdov A P, Eremets M I, Troyan I A, Ksenofontov V, Shylin S I 2015 *Nature* **525** 73
- [8] Tateiwa N, Haga Y, Matsuda T D, Fisk Z, Ikeda S, Kobayashi H 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 046105
- [9] Tateiwa N, Haga Y, Fisk Z, Ōnuki Y 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 053906
- [10] Alireza P L, Julian S R 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4728
- [11] Jackson D D, Aracne-Ruddle C, Malba V, Weir S T, Catledge S A, Vohra Y K 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2467



- [12] Kim C C, Reeves M E, Osofsky M S, Skelton E F 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **65** 992
- [13] Struzhkin V V, Timofeev Y A, Hemley R J, Mao H K 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4262
- [14] Timofeev Y A, Mao H K, Struzhkin V V, Hemley R J 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 4059
- [15] Timofeev Y A, Struzhkin V V, Hemley R J, Mao H K, Gregoryanz E A 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 371
- [16] Yu Y, Zhai G J, Jin C Q 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 026201
- [17] Gilder S A, Legoff M, Peyronneau J, Chervin J C 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 30
- [18] Gilder S A, Legoff M, Chervin J C, Peyronneau J 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** L10612
- [19] Bi W 2011 *Ph. D. Dissertation* (St. Louis: Washington University)
- [20] Huang X, Wang X, Duan D, Sundqvist B, Li X, Huang Y, Li F, Zhou Q, Liu B, Cui T 2016 [arXiv:1610.02630](https://arxiv.org/abs/1610.02630) [[cond-mat.supr-con](https://arxiv.org/abs/1610.02630)]
- [21] Taylor R D, Pasternak M P, Jeanloz R 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 6126
- [22] Baudelet F, Pascarelli S, Mathon O, Itié J P, Polian A, D'Astuto M, Chervin J C 2005 *J. Phys.-Condens. Matter* **17** S957
- [23] Wei Q, Gilder S A 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 5131
- [24] Wang X, Hu T L, Han B, Jin H C, Li Y, Zhou Q, Zhang T 2014 *Chin. Phys. B* **23** 070701
- [25] Wu M K, Ashburn J, Torng C J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 908
- [26] Struzhkin V V 2016 *Science* **351** 1260

SPECIAL TOPIC — Recent advances in the structures and properties of materials under high-pressure

## *In-situ* magnetic measurements of substances under extreme conditions\*

Huang Xiao-Li Wang Xin Liu Ming-Kun Liang Yong-Fu Liu Bing-Bing Cui Tian†

(State Key Laboratory of Superhard Materials, College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

( Received 26 December 2016; revised manuscript received 13 January 2017 )

### Abstract

Temperature and pressure are the two most important thermodynamic elements, which determine the existent state of substance. Low temperature and high pressure are significant and key extreme conditions in the modern experimental science, providing new routes for many subjects such as physics, chemistry, materials and biology, and playing an important role in finding new phenomena. The magnetic research under extreme conditions is an important branch of the study of the extreme conditions, which not only presents the magnetic changes of the material under extreme conditions, but also is an important means to explore the high temperature superconductors. In this article, we elaborate the principle and method of measuring the magnetic susceptibility and superconducting transition temperature under high pressure. The *in-situ* magnetic measurement system under high pressure and low temperature is also briefly introduced, designed and installed by ourselves. Using the *in-situ* magnetic measurement system, the magnetic transition of iron and the superconducting transition temperature of the yttrium barium copper oxide sample under high pressure are measured.

**Keywords:** extreme conditions, superconductivity, alternating current magnetic susceptibility

**PACS:** 74.25.Dw, 74.62.Fj, 75.30.Sg, 74.40.Kb

**DOI:** [10.7498/aps.66.037403](https://doi.org/10.7498/aps.66.037403)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11504127, 51572108, 51632002, 11634004, 11274137, 11474127), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT\_15R23), the Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. J1103202), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M570265).

† Corresponding author. E-mail: [cuitian@jlu.edu.cn](mailto:cuitian@jlu.edu.cn)