

高温超导电流也许不会永远持续

具有高临界电流密度的氧化物超导体薄膜的制备,是在为应用而改进的材料性质方面的一个重要发展.高质量的90K超导体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 膜,在77K时临界电流密度可高达 $4 \times 10^6 \text{A/cm}^2$.这一数值以及外延膜的磁性和商品铌钛合金超导体在4.2K的性质相比已相当不坏了.

然而,1988年的几个有关氧化物超导体单晶的实验却给出了使人困惑的结果.实验表明,新的氧化物超导体在有磁场时,其行为可能不同于人们对磁场中超导体行为传统的了解.

大多数实用的超导体都属于第II类超导体.磁场超过某一下临界场时,超导体对磁通量的排斥(或迈斯纳效应)是不完全的.在磁场小于上临界磁场前,磁通量可进入,但超导电性并不破坏.30年来对传统超导体的研究表明,此时,在第II类超导体中磁通量是以磁通线的形式存在的,磁通线沿外场方向,包含一个磁通量子,排列成三角格子,通常称为Abrikosov格子. Abrikosov最早从理论上考虑了第II类超导体存在的可能性.

新的氧化物超导体也是第II类超导体,它们包括临界温度 T_c 为40K的 La-Ba-Cu-O , T_c 为90K的 R-Ba-Cu-O (其中R代表稀土元素), T_c 高到108K的 Bi-Ca-Sr-Cu-O 以及 T_c 高到125K的 Tl-Ca-Ba-Cu-O .1988年的一些实验(如在磁场中超导体磁化强度的弛豫,电阻随温度及磁场变化的测量,Abrikosov格子的磁粉纹图观察以及Abrikosov格子当其在磁场中受迫振动时的机械响应等),甚至在1986年秋最早肯定 La-Ba-Cu-O 超导电性的实验,导致人们对新氧化物超导体单晶中单根磁通线及Abrikosov格子的状态的热烈讨论.

一、磁通蠕动

超导态电阻为零,人们自然会认为超导回路中的电流将永远持续.事实上,当磁场高于下

临界场时,第II类超导体有非零的电阻率,回路中的电流并不真正永久持续.这是1962年安德森在解释Kim等人磁测量结果时最早提出的.当超导体中有电流通过时,磁通线会受到一电磁洛伦兹力的作用.在传统的第II类超导体中,磁通线受到较强的钉扎.在洛伦兹力作用下,磁通线的运动实际上主要是磁通线在热激发作用下越过钉扎中心势垒时所产生的跳跃,称为磁通蠕动(洛伦兹力比钉扎力大时,产生的运动称为磁通流动).当电流小于临界电流时,磁通蠕动会产生能量损耗,但由此而产生的电阻很小,并不影响超导材料的实际应用.通常的第II类超导体中电流可能并不永久持续,但其衰减常数可大于宇宙的使用寿命.

在新超导体中,相反地,磁通蠕动反常地大.这首先是从非平衡磁化强度随时间的变化中观察到. M. Tinkham用这种巨磁通蠕动(giant-flux-creep)的概念,解释氧化物超导体电阻从正常态下降到小到测不出来的数值时,电阻随温度及磁场的变化.对电阻率的温度及磁场关系仔细的测量显示了蠕动过程热激活的性质.

在传统的第II类超导体中,非平衡磁化强度随时间按对数规律变化. Yeshurum和Malozemoff在单晶 Y-Ba-Cu-O 中在低温下观察到这种变化.和安德森的理论比较,得到在新超导体中磁通蠕动的势垒比传统超导体小一个量级(北京大学阎守胜等采用旋转样品磁测量的方法,得到了势垒的分布,也肯定了上述结果——编译者注).他们认为在新超导体中较大的磁通蠕动可能来源于高的临界温度,这意味着有更多的热能使磁通线越过势垒;较大的磁通蠕动也可能来源于短的相关长度,这意味着势垒较低.他们也肯定了氧化物超导体的 $H-T$ 平面相图上,有一条磁场 H 随温度对 T_c 偏离的 $3/2$ 次方变化的不可逆线(至少对一定范围的 T, H 是如此)这最早是Müller等在多

晶 La-Ba-Cu-O 上观察到,并推断单晶中亦有类似的行为。

在不可逆线以下,按照 Yeshurum 等的意见,存在 Abrikosov 格子,但它是无序的,尽管受到晶体缺陷的钉扎,但仍有大的磁通蠕动,而且和传统的第 II 类超导体一样,在给定的 T, H 下的磁化强度依赖于样品的冷却方式:加场冷却或零场冷却。在不可逆线以上,两种冷却方式得到的磁化强度相同,磁通线可在晶格中自由运动。根据这种思想, Yeshurum 等推断不可逆线的位置将依赖于测量频率。这一推断对 Y-Ba-Cu-O 样品已为实验所证实。在 Bi-Ca-Sr-Cu-O 中,不可逆线的频率依赖关系特别大,固定磁场为 1000Gs 时,频率变化 5 个数量级,不可逆温度可改变 30K。

第 II 类超导体在磁场中的 I-V 关系有一斜率很小的线性区,这来源于磁通蠕动。电流较高时,电压随电流指数增加。(常用线性区和指数区的转折点来确定临界电流的大小)磁通蠕动的电阻来源于磁通线热激活的跳跃,应随温度的上升而增加。事实上,类似于其它热激活过程,磁通蠕动电阻率指数地依赖于温度,这在 Bi 系和 Y 系超导体的超导相中得到了证实。

二、磁通格子的熔化

氧化物超导体中磁通格子的行为与通常的不同,最早的直接证据是 1988 年用磁粉纹图技术观察磁通格子结构的实验。贝尔实验室 Gammel 等人用 Y-Ba-Cu-O 单晶样品,在 4.2 K 磁场大到 500Gs 时,观察到了很好的 Abrikosov 格子。但在 77K,没有磁通格子存在的证据。可能的原因之一是在某个温度 T_m 以上,磁通格子熔化了。二维超导体中有这种情况。氧化物超导体的相关长度很短,意味着 Cu-O 面间弱的耦合,这观点说明在超导破坏前存在着磁通格子熔化的可能性。在熔化了了的磁通格子中,磁通线可自由运动,其位置在时间和空间上彼此均无明显的关联。

晶态固体具有刚性,即有非零的切变模量。一个磁通格子也会抵抗在磁场中改变其取向的

力。如将一超导样品固定在机械振子上,当振子受推动作垂直于磁场方向的运动,且速率慢于压缩磁通格子的弛豫时间时,磁通格子的弹性模量会产生一恢复力作用于振子。如格子已熔化,磁通线会很快地弛豫到与样品在磁场中瞬时位置相平衡的位形,对振子的响应没有贡献。贝尔实验室小组用 Y-Ba-Cu-O 和 Bi-Ca-Sr-Cu-O 样品做了这类实验,通过在给定定场下温度增加振子频移的消失,可确定格子的熔化温度 $T_m(H)$ 。在频移消失处,还看到了预期出现的能量损失峰。因此,按贝尔小组的结果,在氧化物超导体的 $H-T$ 平面相图上,有一磁通格子的熔化曲线 $T_m(H_m)$,这条线类似于不可逆线,均在超导态转变成正常态的 $T_c(H_c)$ 线以下。熔化曲线是否就是不可逆线,人们还有不同的看法。目前实验得到的熔化曲线是一条直线而不是弯的曲线。两者有差别的原因可能来源于实验所涉及的磁场范围和时间标度的不同。

三、磁通纠缠 (flux entanglement)

磁通线的能量比例于其长度。在温度不等于零时,由于热起伏磁通线会发生弯曲,弯曲的磁通线比直的更长一些,能量也更高一些。对大多数传统的超导体,由于温度低,故磁通线弯曲很小。这就是为什么传统超导体中 Abrikosov 格子是三维的,而不是沿外场方向堆垛的不相关的一叠二维格子的原因之一。最近 Nelson 和 Seung 进行了有关磁通线的仔细的统计力学研究。Houghton 和 Pelcovits 以及 Moore 等用简单的弹性理论研究了 Abrikosov 格子的熔化问题。

Nelson 和 Seung 发现了几种磁通线分布的反常位形。在 Y-Ba-Cu-O 中,出现在稍高于下临界场处。但在 Bi 和 Tl 系超导体中,在 $H-T$ 平面上占据了相当大的区域。一种形式叫非纠缠的 (disentangled) 磁通液体, Abrikosov 格子是熔化的(因而是液体),但磁通线的弯曲小于磁通线之间的距离,磁通线保持彼此之间无纠缠。在较高温度和磁场下,磁通线的

弯曲可大于相互间的距离,成为相互纠缠的 (entangled) (见图)。

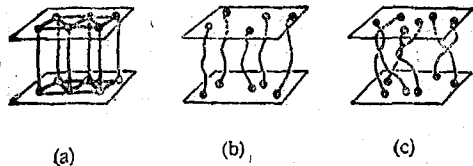


图1 磁通纠缠

[在新氧化物超导体中, Abrikosov 格子 (a) 可能会熔化,磁通线会有新的位形,如非纠缠的磁通液体 (b) 和纠缠的磁通液体 (c)]

有些人认为在不可逆线以下,在新的氧化物超导体中,磁通线可能是无规分布并冻结的,在大多数实验的时间尺度内是不迁移的。这种位形类似于原子位置冻结但无序排列的玻璃。在 $H-T$ 平面上,玻璃状的磁通位形发生在哪个区域还不清楚。Morgenstern 认为在 $H-T$ 平面上,熔化曲线可能低于不可逆线,在这之间,磁通线可能处于玻璃位形。Rossel 等在 Y-Ba-Cu-O 磁性方面观察到在自旋玻璃中报道过的“记忆效应”。在他们的实验中, Y-Ba-Cu-O 样品在某一固定磁场和温度 (低于 T_c) 下保持够一定的“等待”时间,然后改变磁场,在

(上接第 152 页)

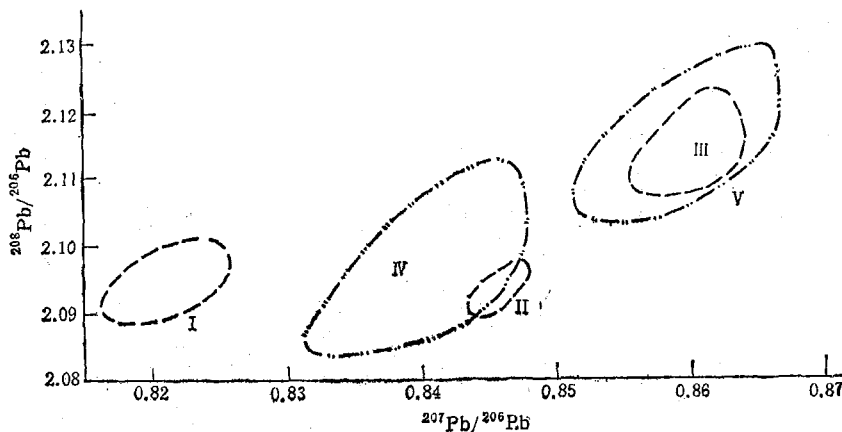


图4 广西冷水冲型铜鼓铅同位素分布场与广西冷水冲型铜鼓分布地区矿物铅同位素分布场比较

感谢中国科技大学李志超教授的指导,感谢冶金工业部天津地质研究院同位素室及天津地质矿产研究所同位素实验室主任黄承义先生的帮助。

[1] 万辅彬等,中国少数民族科技史研究(第五辑),内蒙古

和等待时间相比的时间内,非平衡磁化强度的衰减曲线随时间类似于在自旋玻璃中所看到的按对数律变化,这反映了磁场的改变。他们认为对氧化物超导体,巨磁通蠕动图象仅在短的时间尺度和低温下是对的。为解释新发现的记忆效应,需要引入超导玻璃理论,这种理论可看成是巨磁通蠕动图象的推广,在较高温度和较长的时标内正确。

由于在某些磁场值和温度值磁通蠕动较大,某些高温氧化物单晶中电流的持续不会像传统超导体在低温下持续得那么久。这种效应的大小对不同的新超导体系统会有所不同。对某一应用可能要决定哪一种材料更合适。对很多应用,如功率传输,磁通蠕动电阻是没有什么关系的。

和单晶相比较,薄膜临界电流较大,这可能意味着存在新的磁通钉扎机制。由于相关长度很短,在膜中磁通线可能受点缺陷的钉扎。在传统超导体中,点缺陷对钉扎是不重要的。按 Zürich 小组的意见,玻璃行为的机制也许提供了一种高临界电流所要的钉扎。

(阎守胜根据 *Physics Today*

1989 年第 3 期第 17—21 页编译)

人民出版社,(1988),197。

- [2] 广西壮族自治区文物工作队,考古, No.5(1985), 404.
 [3] G. Faure, Principles of Isotope Geology, Chapter 13, (1977), 227.
 [4] 地质部宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室,铅同位素地质研究的基本问题,地质出版社,(1979),16.