

超导材料、理论新进展及应用前景

章 立 源

自从 1911 年卡末林·昂尼斯首次发现超导电性以来,已经历了四分之三世纪以上的岁月了。然而,人类对超导电性的研究和应用仍然没有达到完美的境地。尽管如此,超导电性学科和技术仍已步入它的青壮年时期,并且人们认识到:一旦室温超导材料被发现,则人类现代技术文明的一切都将随之发生巨大变革。

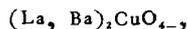
一、高温氧化物新超导材料的发现

直到 1985 年,人类发现的超导材料的超导转变温度 T_c 都较低,只能在液态氮温度下工作,这个条件限制了超导技术的应用。想方设法提高 T_c 是几十年来人们努力寻求的目标,其中一个方向就是研究氧化物超导体。这始于几十年前,从当时的尺度来看,已获得 T_c 值不算很低的研究结果,因而一直受到关注。

大约在 1984 年,IBM 的苏黎世实验室研究人员 Bednorz 和 Müller 开始了氧化物超导体的研究,以探索高 T_c 超导材料。后来,他们转向研究钡、镧、铜氧化物,取得了初步成功迹象,于 1986 年 4 月宣布

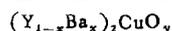


($x = 1$ 或 0.75 , $y > 0$) 可能在温度高于 30K 范围内显示超导电性。其后的研究都证实了他们的发现,从而为解决高 T_c 超导材料问题开辟了一条道路。他们在发表的文章中只测了零电阻效应,而作为超导材料必须具备两个基本特性,一是电阻为零,二是完全抗磁效应(Meissner 效应),所以这项研究还不完备。1986 年 11 月和 12 月,日本东京大学 Uchida 等人宣布,对于

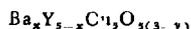


单相观察到 $T_c \approx 30\text{K}$, 并有 Meissner 效应。他们还肯定了高 T_c 的 La-Ba-Cu 氧化物为 K_2NiF_4 型结构。

1987 年 2 月美国朱经武研究组宣布



($x = 0.4$ $y < 4$) 系统于 $80-93\text{K}$ 温区内获得稳定的超导转变。在常压下,“零电阻态”的电阻率小于 3×10^{-9} 欧姆·厘米。这就首次实现了超导转变温度在液氮沸点以上的超导性。在朱经武等人稍后的报导中还提到曾观察到在更高的温度下发生的极不稳定、难以重复的超导转变现象。2 月 24 日中国科学院宣布在



系统中超导转变中点温度为 92.8K , 出现“零电阻”的温度为 78.5K 。

1987 年,正当大家纷纷用稀土元素取代 Y-Ba-Cu-O 中的 Y 以获得新的高 T_c 系统时,法国的 Caen 大学 Raveau 小组大胆提出不用稀土元素制造高超导转变温度材料的设想。6 月下旬,他们宣布制成了 Bi-Sr-Cu-O 新超导材料,其 T_c 在 $7-22\text{K}$ 之间。尽管这个超导转变温度比较低,但它不含稀土元素,因而引起了一定的注意。1988 年 1 月 22 日,日本宣布了基于铋、锶、钙、铜及氧的超导材料,其超导转变温度约为 105K 。另外,美国 Arkansas 大学的 Hermann 及 Z. Z. Sheng 发现, Tl-Ba-Ca-Cu-O 系统,超导转变温度约为 123K 。迄今在此系统上获得的最高电阻为“零”的温度为 125K 。

二、对高温氧化物超导材料超导机制的探索

自从高 T_c 氧化物超导体问世以来,其超导机制问题迄今尚未解决。问题的焦点是:原来对超导电性微观机制行之有效的 BCS 理论,连同由之推广了的强耦合超导理论是否也适用于新的氧化物超导材料?或需作何种修正?或者要有新的理论去代替?

首先,隧道结的实验研究表明,电子对(或一般地说是载流子对)的机制仍然应是新超导材料机制中的基本点。问题是在新材料中电子对可能有新的特殊之处。

Mattheis 首先对 $\text{La}_{2-x}\text{Y}_x\text{CuO}_4$ 系统作了能带计算,认为“掺杂”元素(Ba 或 Sr 等)的基本作用是抑制电荷密度波畸变以导致高 T_c 超导电性。基于 Mattheis 的工作,以 McMillan 强耦合超导理论对超导转变温度的定量计算是重要的。Weber 作了这种计算,其结果总的来看只能说:不能完全排除传统超导理论的适用性,但至少对它要作重大修正。

这种情况使许多人尝试作不同模型的设想。如 Anderson 提出了共振价键理论(简称 RVB 理论)。这种理论认为未掺杂之前的共振价键态中预先存在有最近邻自旋单态电子配对,当掺杂了少量二价离子后使材料金属化了,这些对就对超导电性起作用。

Varma 等人对高温氧化物超导材料提出了激子模型,认为材料中任何两电子通过交换局域激子可以互相吸收,这导致电子配对。

本文作者则详细论证了自由载流子(电子或空穴)与负 U 中心(电子-电子或空穴-空穴)相互作用机制。考虑到新材料的特点是处于金属与绝缘体分界线边缘的金属态,我提出了在新材料中存在两大子系统。一是“自由”载流子系统,尽管其密度可能很低;另一子系统为负 U 中心系统,这是假设系统中存在局域化的电子对,对内两电子间存在相互吸引作用(即关联能为一 $U, U > 0$)。新超导材料的新物理起源于“自由”载流子与组成负 U 中心的近局域载流子之间的混杂(mixing)作用。在这一模型下的理论计算表明,这种混杂作用大大提高了超导转变温度。这是因为,借助于自由载流子与负 U 中心内局域载流子之间的混杂作用,使自由载流子之间的等效吸引大为增进,从而极大地有利于超导电性之增进。按这一机制已能就高温氧化物超导材料的 T_c 为什么高、超导转变宽度较大、在 T_c 处的比热跳跃实验值、相干长度实验值、热力学临界场及超导穿透深度等作出合理解释。特别是我们的理论预言,在高 T_c 氧化物超导体的超导能隙能量范围之内存在有小的态密度。最近, S. L. Cooper 等人对单晶 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 的喇曼散射实验确实表明在能隙内存在少量电子态。

然而,目前有关超导机制问题还远未解决,人们对于理论和实验的工作正向深入细致方向发展。

三、超导应用前景

马梯阿斯曾说:“如果在常温下,例如 300K 左右能实现超导现象,则将使现代文明的一切技术发生变

(上接第20页)

化和比威力(威力与弹的重量之比)都很大。例如美国 80 年代初期研制的 MX 导弹的子弹头,每个重量不足 200 公斤,而威力却接近 50 万吨梯恩梯当量。目前已研制出的特殊性能氢弹有中子弹和冲击波弹。中子弹的正式名称叫增强辐射武器,是一种以中子杀伤效应为主的小型氢弹。它的当量一般在 1~2 千吨,设计上以氘氟气体作热核装料,并让产生的高能中子有较大

(上接第32页)

的几率(例如 60% 以上)穿出弹体。冲击波弹则是一种以冲击波毁伤效应为主的万吨级氢弹。它的主要特点是放射性沉降少,与同当量的纯裂变弹相比,放射性沉降要减少 10 倍以上。因此它的另一名称叫减少剩余放射性武器。从总的趋势上看,氢弹技术还在进一步发展,当前的主要动向是探索以核 X 光激光和核电磁脉冲弹为标志的第三代核武器。

除了参加探测器的建造外,这三个组还在国内积极创造条件,准备开展 LEP 实验的数据分析。现在高能所和科技大学的计算中心都已移植了 CERN 全

部程序库,发展了 L3 和 ALEPH 的分析程序,建立了适应于高能实验数据分析的工作环境。同时,高能所还通过卫星利用 X25 通讯接口实现了与 CERN 的计算机连网(LinK),这为相距遥远的高能所与 CERN 之间的通讯、文件传递,以及数据传输提供了极大的便利。这几个组的实验工作者还同国内理论界展开经常的 LEP 物理讨论会,为在国内不失时机地做出有意义的物理结果积极工作。

化”。这是对超导技术应用前景的确切评论。概括起来,超导技术将用于下列的广泛领域:
电能输送 电动机发电机制造
发电厂结构之改变(包括磁流体发电兴起)
超导线圈储能技术
超导磁悬浮列车 超导电子计算机
超导电子学器件 超导磁体
高灵敏度电磁仪器 地球物理探矿技术
地球研究技术 医学临床应用
针灸机理研究 特异功能研究
生物磁学学科大发展
强磁场下物性及生物变异之兴起
军事应用

等等。应用涉及能源、交通、自动化、通讯、地质、医学、军事、基本科学等广大的领域。

当前,在尚未发现室温超导材料的情况下,除应大力继续寻求其它高温超导材料外,还应使液氮温区出现超导电性的材料实用化。从现实情况看, Bi-Sr-Ca-Cu-O 材料性能较稳定而不很脆,易于制作,是宜于进行实用研究的一种材料。就不同的实用方向而言,超导电子器件的应用预计将比在电力工程上之应用发展更快,从开发的角度来看,这一点值得注意。

超导应用的开发投资较大,不一定能见到速效。但是,由于它对国计民生及军事有重大意义,可以说,谁能在这场国际竞争中领先,谁就进入了先进国家之列。

在廿一世纪,人类终将发现,超导技术革命使他们的生活比上一世纪有着深刻的变化。

目前,中国高能物理学界与国外的同行一样,正以兴奋的心情注视着 LEP 实验的每一个进展与成就。