

超导电性的研究及应用

杨 军

(南京大学物理系 江苏 210093) (解放军理工大学理学院数理系光学教研室 南京 210007)

1911 年, 荷兰莱顿大学的卡茂林- 昂尼斯(H. Kamerlingh Onnes) 在实验中发现将汞冷却到绝对温度 4. 2K 时(- 268. 98 e , 绝对温度零度相当于零下 273 摄氏度) 其电阻突然消失并由此开始了超导研究, 昂尼斯称这种处于超导状态的导体为超导体。昂尼斯也凭这一发现获得了 1913 年的诺贝尔物理学奖。

一、超导体的特性和分类

超导体电阻突然变为零的温度叫超导临界温度 (T_c)。目前已经发现的一半的金属元素和成百上千种合金与化合物都是超导体, 但是他们的转变温度 T_c 都较低。直到 20 世纪 80 年代中期 T_c 也未能突破 30K 大关, 人们把此类超导体称之为常规超导体。1986 年以后, 人们在多元的铜氧化物中发现了一系列 T_c 超过 30K 的超导体, 物理学家穆勒 (Mueller) 和伯诺兹 (Bednorz) 发现了高温铜氧化物超

导体 $La_{2-x}Ba_xCuO_4$, 其超导临界温度达 40K。1987 年 2 月, 美国华裔科学家朱经武和中国科学家赵忠贤相继在钇 $YBa_2Cu_3O_7$ 系材料上把超导临界温度提高到 90K 以上, 液氮的禁区 (77K) 也奇迹般地被突破了。1987 年底, $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_2O$ 系材料又把临界超导温度的记录提高到 125K。目前公认 T_c 最高的材料 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ 临界温度达 133K, 加压力 T_c 可达 160K 以上。这些材料绝大多数都可在液氮的条件下应用, 人们将此类超导体称为高温超导体。从 1986 年至今国内外还有很多更高 T_c 甚至接近室温的报道, 但可惜现象都不稳定, 样品难于重复或不能重复, 被朱经武教授戏称为/ 不明超导体 (unidentified superconducting objects, USO)。

超导体的直流电阻率在一定的低温下突然消失, 被称作零电阻效应。1933 年, 荷兰的迈斯纳和

左右, 是很有用的。因为一般的通用谱仪要探测的粒子大多是在 1GeV/c 左右, 例如 BELLE 探测器就用了

0.25~ 1GeV/c 的粒子束作刻度。所以我们试验束的动量范围与世界上其他的试验束有较好的互补性。

设备名	可用粒子种类	可调动量范围	可用日期
FNAL2MTF	p, K, P, L, e	5~ 120GeV/c	现在
SLAC2ESA	C, e^+ , 强子	电子, 45GeV 以下	现在
SLAC2FFTB		强子, 13GeV 以下 5~ 20GeV/c	
Protvino 的高能物理所	强子, e, L	电子, 45GeV 以下 强子, 33~ 45GeV	2004 年开始
BNL2AGSB2	e, p, K, P, L,	10GeV 以下	
DESY Test Beams 21, 22, 24	正负电子	1~ 6GeV/c	现在
CERN Beam Lines	强子与电子	350GeV/c 以下	现在
Frascati2TBF	电子	50~ 750MeV/c	现在
KEK Test Beams P 2 and T 1 KEK2JHF2TB	e, p, K, P, L	0. 2~ 4GeV/c	2004 年底关闭
		0. 5~ 10Gev/C	计划中

我们的 E3 束已经为北京谱仪飞行时间探测器 (TOF) 模型提供了刻度用的束流, 得到了有意义的结果; E1 束也成功地提供给了强流慢正电子组用; E2 束已经成功地为 BES 的 L 探测器模型 (RPC) 幅照损伤研究提供了幅照条件; 打靶产生的高能混合粒子幅照区为小麦等作物的育种研究提供了幅照

条件(与农科院的合作项目); 用现有磁铁所产生的强磁场, 还测量了强磁场对光电倍增管性能的影响等。

我们的试验束是目前国内唯一的高能粒子试验束, 其性能在国际上也有互补性。我们衷心欢迎国内外用户来使用。

奥森菲尔德共同发现了超导体的另一个极为重要的性质,当金属处在超导状态时,超导体内的磁感应强度为零,原来存在于体内的磁场(磁力线)被排挤出去,人们将这种现象称之为/迈斯纳效应⁰。有此效应的超导体称为第一类超导体,磁场超过 $H_c(T)$ 以后,磁力线将透入样品内部,同时超导也就被破坏,恢复为正常态。以后科学家又发现对于超导合金,磁场可以透入超导体的内部,但不破坏超导性,持续电流仍然存在,这类超导体称为第二类超导体。

二、超导电性的理论研究

超导电性的本质究竟是什么?一开始人们便从实验和理论两个方面进行探索,不少著名科学家为此负出了巨大努力。然而直到 50 年代才获得了突破性的进展,BCS 理论的提出标志着超导电性理论现代阶段的开始。BCS 理论是由美国物理学家巴丁(Bardeen)、库珀(Cooper)和施里弗(Schrieffer)于 1957 年首先提出的,并以三位科学家姓名第一个大写字母命名这一理论。BCS 理论认为电子间通过交换虚声子产生超导基态,费米面附近相反动量及自旋的电子通过吸引互作用形成了束缚电子对状态,称为库珀对组态。BCS 理论可以解释常规超导体中的超导持续电流、迈斯纳效应和比热容的反常变化等一系列超导现象,习惯上人们又将常规超导体称为 BCS 超导体。1962 年英国剑桥大学研究生约瑟夫森(Josephson)根据 BCS 理论预言,在薄绝缘层隔开的两种超导材料之间有电流通过,即库珀对能穿过薄绝缘层(隧道效应);同时还产生一些特殊的现象,如电流通过薄绝缘层无需加电压,倘若加电压,电流反而停止而产生高频振荡,这一超导物理现象称为约瑟夫森效应。这一效应在美国的贝尔实验室得到证实。约瑟夫森效应有力地支持了 BCS 理论。因此,巴丁、库珀、施里弗荣获 1972 年诺贝尔物理奖。约瑟夫森则获得 1973 年度诺贝尔物理奖。

高温超导电性的产生机理比较复杂,到目前为止还处于探索阶段,因为它涉及电子的电荷、自旋和轨道之间以及它们与晶格之间十分强烈的耦合,以及电子与电子,电子与声子以及声子之间的互作用等等,需要用到强关联系统来研究。但科学家目前对高温超导态已经取得一些共识:比如超导态仍然是库珀对的相干凝聚态、主要是各向异性的 d 波配对、复杂的同位素效应和不同于 BCS 超导体的低温特性等。

三、超导电性研究的新进展

近年来人们对超导电性研究又不断取得新的进

展,如新发现的新型超导体 C_{60} , C_{60} 被誉为 21 世纪新材料的/明星⁰,有较大的发展潜力,由于它弹性较大,比质地脆硬的氧化物陶瓷易于加工成型,而且它的临界电流、临界磁场和相干长度均较大,这些特点使 C_{60} 超导体更有望实用化。这种材料已展现了机械、光、电、磁、化学等多方面的新特性和应用前景。有人预言巨型 C_{240} 、 C_{540} 合成如能实现,还可能成为室温超导体。2001 年初发现金属化合物二硼化镁(MgB_2)其超导转变温度达 39K,并已证实是电声子机制的常规超导体。二硼化镁的发现为研究新一类具有简单组成和结构的高温超导体找到新途径,其易合成和加工,容易制成薄膜或线材,可应用于电力传输、超级电子计算机器件以及 CT 扫描成像仪等方面。 C_{60} 和 MgB_2 的发现突破了常规超导体的 T_c 一般不超过 30K 的传统信念,引起了人们的极大兴趣,已成为当前超导电性研究的热点问题。高温超导材料的下一个目标是使超导临界温度达干冰温度(240K)和室温(300K)。利用氟、氮、碳部分取代氧,或在钇钡铜氧化物中加铟、铌和某些金属元素,有可能制备出室温超导体。此外,金属氢是否有希望成为室温超导体,这已引起一些科学家的关注。

四、超导电性的应用

科学研究的最终目的在于应用,随着研究的进展,超导体在电力能源、超导磁体、生物、医疗科技、通信和微电子等领域有广泛的应用,大致可分为以下几类:

1. 大电流应用(强电应用)

在电力领域,利用超导线圈磁体可以将发电机的磁场强度提高到 5 万~6 万高斯,超导发电机的单机发电容量比常规发电机提高 5~10 倍,达 1 万千瓦,而体积却减少 1/2,整机重量减轻 1/3,发电效率提高 50%。输电电缆被认为是实现高温超导应用的最有希望的领域。传统电缆由于有电阻,电流密度只有 300~400 安培/平方厘米,而高温超导电缆的电流密度可超过 10000 安培/平方厘米,传输容量比传统电缆要高 5 倍左右,功率损耗仅相当于后者的 40%。因而在城市中心配电、水电站等需要大电流的场合具有重要的应用价值。有专家预测,按现在的电价和用电量计算,如果我国输电线路全部采用超导电缆,则每年可节约 400 亿元。超导限流器则是利用超导体的超导/正常态转变特性,有效限制电力系统故障短路电流,能够快速和有效地达到限流作用的一种电力设备。专家们预言,就高温超

导体在电力系统中的应用而言,最先得到实际应用的将可能是超导限流器。据估计,超导限流器的国际市场在 2010 年左右将可望达到 35 亿美元。超导储能装置是利用超导线圈将电磁能直接储存起来,需要时再将电磁能返回电网或其他负载的一种电力设施。一般由超导线圈、低温容器、制冷装置、变流装置和测控系统几个部件组成。目前美国、日本、德国等一些发达国家在超导储能装置方面的研究上投入了大量的人力和物力,并且有许多在建的超导储能装置。据预测,到 2010 年全世界对超导储能装置的需求将在 15 亿美元左右。当然,目前超导材料的应用还受到一些不利因素的限制:一是超导体内的电流会受到大磁场的阻碍;二是一些最具应用潜力的材料会因为晶粒界而完全阻止电流流动;三是与其他陶瓷材料一样,这些材料不能轧制成导线。

2. 电子学应用(弱电应用)

高速计算机要求集成电路芯片上的元件和连接线密集排列,但密集排列的电路在工作时会产生大量的热,影响系统的稳定性,散热也是超大规模集成电路面临的难题。如果超大规模集成电路中元件之间的互连线用零电阻或接近零电阻的、不发热或仅微发热的超导器件来制作,则不存在散热问题,亦更能提高计算机的运算速度同时减小器件的尺寸。美国一研究小组研制了一种新的更快的计算机芯片,这种芯片是由氧化铝薄层连接的铌导线制成的。它比目前最快的奔腾电脑快约 99 倍,而每次运行时所产生的热量却特别低。此外,有人提出用半导体和超导体来制造晶体管或完全用超导体来制作晶体管,目前这一工作还处在最基础的前期研究阶段,能否获得成功还有待观察。

由超导约瑟夫森结制成的超导量子干涉器(SQUID)磁强计是极其灵敏的磁场探测仪器,它可以分辨相当于十亿分之一的地磁场变化,广泛用于科学研究、生物磁(脑磁、心磁)、无损探伤及大地电磁测量等领域,是高温超导体最早走向实用化的领域之一。利用超导材料做成的探矿仪器,装在飞机甚至卫星上,可以大面积地探测某些矿藏的分布。北京大学物理系和中科院物理所经过几年的努力,已研制成功工作于液氮温度的高温 SQUID,该仪器的性能指标已满足实际应用的要求。1998 年我国的几家单位与德国的科学工作者成功地进行了大地测量用 SQUID 磁强计系统的野外实验,证明了目前研制成功的高温 SQUID 系统已经成熟,伴随着数据处理软件的完善和

仪器操作系统的进一步简化,高温 SQUID 将可能逐步取代瞬变电磁法大地电磁测量的感应探头,并得到较大范围的应用。高温超导(HTS)SQUID 另一项引人注目的课题是 HTS 扫描 SQUID 显微镜。美国 Neocera 公司正研制和销售这种系统。

利用高温超导体制作的微波无源器件在几年内将会有实际应用。随着制备技术的进步,利用高温超导体也可制作某些微波有源器件。超导天线、超导谐振腔等也会开始应用。高温超导体在微波技术上的应用估计会首先在卫星通信和军事技术上实现。例如热电子测热辐射电阻(HEB)混频器。高温超导有源微波器件的一项新进展是用钇钡铜氧化物(YBCO)研制热电子测热辐射电阻(HEB)混频器。工作在 4K 的 Nb₂HEB 与通常的隧道结混频器相比是更有竞争力,因为它不受超导能隙所规定的截止频率的限制。YBCO₂HEB 目前虽然还处于初步的研究阶段,但在 60~80K 的温度范围内有可能提供灵敏的、所需本振频率很小的超外差探测器。这种 HEB 采用极薄(10~20nm)的 YBCO 膜制备的,图形尺寸在深亚微米的量级。近几年我国开展了多种超导微波器件的研究,制成的超导滤波器、超导天线、延迟线、振荡器、超导结型混频器等器件都具有国际先进水平。1999 年中科院紫金山天文台新近研制成功安装在 13.7 米毫米波射电天文望远镜上的超导 SIS 接收机。超导 SIS 混频技术是当今最先进的低噪声、高灵敏度检测技术,其接近量子极限的噪声性能使它成为射电天文及大气物理研究中分子谱线观测的首选手段。目前,国际上多数毫米波和亚毫米波射电天文望远镜已采用超导 SIS 接收机。美国、日本、法国等发达国家正在将这项技术应用于球载项目和空间项目。专家认为,这是我国首次将低温超导技术应用于实践,它不仅使我国毫米波、亚毫米波射电天文观测能力实现了新的飞跃,而且为超导低噪声检测技术在国民经济和国防建设上的推广应用打下了重要基础。

所有的无线电接收装置在接受外界讯号时总伴有一定的噪音。噪音主要可分为两部分:一是外界信号带入的,可用检波的方法加以消除;二是装置的线路内部产生的噪音。这一部分也可以用许多方法使之尽量减少,但是不管我们如何努力,也不能将噪音减到零。这是由于电路中存在一种所谓的热噪音,它起源于电阻、电感和接线中的电子和晶格的碰撞。可以说对于有阻元件,热噪音是不可避免的。高温超导

体在超导态下电阻为零,这意味着高温超导体的热噪声十分小(但不为零)。用高温超导体做成的滤波器,自然可将前级放大器中的热噪声消除,又不引入新的热噪声,这就大大地提高了信噪比。最近美国一通信公司使用了高温超导滤波器,其通话能力提高了一倍。美国在 1995 年蜂窝电话(即大哥大)的用户已超过 1000 万,并以每年两位数以上的百分比速度上升。几家开发超导技术的公司,集中力量进行有关超导移动通信设备的研制。欧洲 1996 年提出以 SUCOM 命名的高温超导通信系统研究计划,包括两所大学、三个研究所和四家商业公司、五个国家,目标是为第三代移动通信系统研制新型高温超导器件。

3. 抗磁性应用

超导材料的另一重要特征是具有完全的抗磁性。如果把超导材料放在一块永久磁体之上,由于磁体的磁力不能穿过超导体,磁体和超导体之间就会产生斥力,使超导体悬浮在磁体上方。超导磁悬浮列车利用超导磁石使车体上浮,通过周期性地变换磁极方向而获得推进动力。日本于 1977 年制成了 ML500 型超导磁浮列车的实验车,1979 年宫崎县建成全长 7000 米的试验铁路线,1979 年 12 月达到了每小时 517 公里的高速度,证明了用磁悬浮方式高速行驶的可能性。1987 年 3 月,日本完成了超导体磁悬浮列车的原型车,其外形呈流线形,车重 17 吨,可载 44 人,最高时速为 420 千米。车上装备的超导体电磁铁所产生的电磁力与地面槽形导轨上的线圈所产生的电磁力互相排斥,从而使车体上浮。槽形导轨两侧的线圈与车上电磁铁之间相互作用,从而产生牵引力使车体一边悬浮一边前进。我国从 70 年代开始进行磁悬浮列车的研制,首台小型磁悬浮原理样车在 1989 年春/浮0起来了。1995 年 5 月,我国第一台载人磁悬浮列车在轨道上空平稳地运行起来。这台磁悬浮列车长 3.36 米,宽 3 米,轨距 2 米,可乘坐 20 人,设计时速 500 千米。1996 年 7 月,国防科技大学紧跟世界磁悬浮列车技术的最新进展,成功地进行了各电磁铁运动解耦的独立转向架模块的试验。目前,美国正在研制地下真空磁悬浮超音速列车。这种神奇的/行星列车0设计最高时速为 2.25 万千米,是音速的 20 多倍。它横穿美国大陆只需 21 分钟,而喷气式客机则需 5 小时。高超导在运载上的其他应用可能还有用作轮船动力的超导电机、电磁空间发射工具及飞机悬浮跑道等。

利用超导体产生的巨大磁场,还可应用于受控制热

核反应。核聚变反应时,内部温度高达 1 亿~2 亿 e,没有任何常规材料可以包容这些物质。而超导体产生的强磁场可以作为/磁封闭体0,将热核反应堆中的超高温等离子体包围、约束起来,然后慢慢释放,从而使受控核聚变能源成为 21 世纪前景广阔的新能源。

4. 医学上的应用

超导磁体在医学上的重要应用是核磁共振成像技术,核磁共振成像技术可测定生物体中氢原子核以及特定原子核构成的物质,通过核磁共振扫描,检测生物体组织发生的种种变化,再经过计算机处理,把变化显示出来,从而发现生物体组织的病变。该仪器对于癌症的诊断极为有效。由于磁共振成像不使用放射线,又不接触人体,所以对人体组织无损害。另外,利用超导体介子发生器可以治疗癌症,利用超导磁体可以治疗脑血管肿瘤等。

5. 军事上的应用

超导技术在军事上有广泛的应用前景,主要体现在:°超导计算机:超导计算机应用于 C3I 指挥系统,可使作战指挥能力迅速改善提高;°超导探测器:利用超导器件对磁场和电磁辐射进行测量,灵敏度非常高,可用于探测地雷、潜艇,还可制成十分敏感的磁性水雷。超导红外毫米波探测器不仅灵敏度高,而且频带宽,探测范围可覆盖整个电磁频谱,填补现有探测器不能探测亚毫米波段信号的空白。利用超导器件制造的大型红外焦平面阵列探测器,可以探测隐身武器,将大大提高军事侦察能力。»大功率发动机:这种发动机具有能量大、损耗小、重量轻、体积小等优点,可用作飞机、舰艇等的动力装置。¼超导储能系统:利用超导材料的高载流和零电阻特性,可制成体积小、重量轻、容量大的储能系统,用作粒子束武器、自由电子激光器、电磁炮的能源。½超导磁流体推进系统,为水面舰艇和潜艇提供动力。

总之,在可以预见的将来超导电性的研究和应用必将有一个突飞猛进的发展,据预测,2010 年和 2020 年,世界超导市场将分别达到 300 亿美元/年和 2440 亿美元/年。不久的将来,我国的能源、医疗卫生、电子技术和科学仪器等方面发展将会迫切需要超导技术的广泛应用。美国、日本、德国等国家关于超导产品的市场估计,均把我国作为重要市场之一。能否抓住超导技术发展提供的历史性的机会、争取在这一新兴高技术产业中占有一席之地,是我国超导技术发展面临的一个重要课题也是给中国科学家提出的一个挑战。