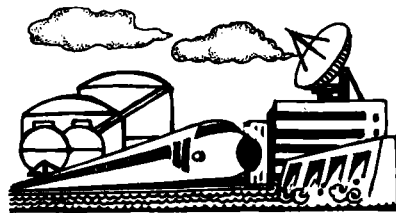


超导电性及应用介绍

杨 惠 山

(泉州师范专科学校 362000)



一、超导的发展概况

1911年荷兰物理学家 Onnes 发现纯的水银样品在 4.2K 附近电阻突然消失,接着又发现其他一些金属也有这样的现象,这一发现开辟了一个崭新的超导物理领域。

超导的研究和应用开发经历了几个阶段。从 1911 年到 30 年代中期是前期阶段,这段时期人们发现了最基本的超导现象,并且开始认识到超导现象的本质是一种宏观尺度的量子效应。第二阶段是从 30 年代中期到 50 年代中期,研究工作集中在认识超导的物理机理。在 50 年代中期建立了基本正确的超导微观理论,这是现代凝聚态物理的一个最重要的进展。它不仅基本正确地说明了超导现象的物理本质,而且对整个凝聚态物理的学科发展,产生了巨大的影响。第三阶段是从 50 年代中期到 1986 年,这个阶段的主要成就是:在完善超导微观机理认识的基础上,发现了第 II 类超导电性材料和约瑟夫森效应,同时,超导已有了一定规模的应用。从 1986 年下半年起,由于发现了高温超导氧化物材料,从而使超导研究发展到了一个新的阶段。高温超导电性就其本质来说,仍是配对电子的量子凝聚,唯象的描述与传统的大致相似。几乎所有传统超导体中最主要的物理效应,都在高温超导体中得到证实。然而,目前对高温超导电性的物理机理还没有一个公认的比较合理的解释;对高温超导电性的唯象描述,也还有一些不清楚的重要问题。从实际应用的角度,怎样能得到既有足够好的载流能力而又能容易成型的高温超导材料;怎样制备弱连接高温超导结;怎样按电工学应用的要求制备和加工高温超导的有源和无源的器件等,尚有许多物理、化学、材料科学和工艺技术的困难问题有待解决。

二、超导体的基本性质

1. 零电阻现象 当导体处于某一温度以下时直流电阻变为零的现象。此时导体由正常态转变为超导态,转变温度称为临界温度 T_c 。

2. 抗磁性现象 1933 年迈斯纳等人发现,当导体处于超导态时,磁力线被排斥到导体外,导体内的磁场恒等于零,此种完全抗磁性现象亦叫迈斯纳效应。此性质表明超导体的磁性质只与状态有关,而与导体的降温和加磁场的次序无关。理想导电性和完全抗磁性是超导体的两个基本电磁性质,两者既有联系又保持独立,超导体不同于理想导体。

3. 临界磁场 H_c 超导电性不仅与其温度有关,同时和外磁场有关。当外磁场超过某一数值 H_c 时,超导电性将被破坏。 $H_c(T)$ 随温度的升高而下降,当 $T = T_c$ 时,临界磁场 $H_c(T)$ 降为零。

4. 临界电流 I_c 当通过超导体的电流超过某一数值 I_c 后,超导态也将被破坏而变为正常态。这是由于临界磁场可以由自身电流产生。

三、超导结的特性

1. 正常电子隧道效应

在两块金属电极中间夹一层很薄绝缘层(厚度约为几十到几百Å)的结构叫隧道结。根据量子力学理论,电子可以通过这样薄的绝缘层。在隧道结两端有电压 V 时,能够产生足够大的可观测的电流 I 。这种隧道效应电流的大小除与绝缘层的厚度有关外,还与两电极中的电子态有关。当两个电极都是正常金属 N 时,在不太高的电压范围内(低于 1 伏), I 与 V 呈直线变化。若电极是相同的超导体 S 时,由于超导体的能隙中存在能隙宽度 Δ ,在温度远低于超导体临界温度情况下,如果极间电压 V 满足 $eV < 2\Delta$,除了在能隙上的少量激发电子可以通

过结以外,在能隙下的大量电子都不能通过结,只有微小的电流;当 $eV \geq 2\Delta$,能隙下的电子可以跃迁到能隙上后通过结,故电流陡然上升.如图1所示.

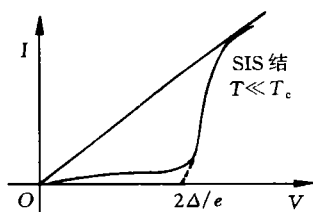


图 1

2. 直流约瑟夫森效应

当 SIS 隧道结绝缘层的厚度只有 10 \AA 时,会出现一种崭新的隧道效应,即超导电子(就是库珀电子对)的无阻隧道效应.在直流电流通过隧道结时,只要电流值低于某一临界电流 I_c 时,则结上不呈现电压,流过结的是超导电流.如一旦超过临界电流值,结上就出现一个有限的电压,结的性质过渡到正常电子的隧道特性,这种超导隧道结能够承载直流超导电流的现象称为直流约瑟夫森效应.

3. 交流约瑟夫森效应

当超导结的结区两端加上直流电压 V 时,(此时电流已超过临界电流),在结区就出现超导的正弦波电流,其频率与所加直流电压成正比,即 $j = j_0 \sin(2\pi\nu t + \alpha)$

式中 $\nu = 2eV/h = V/\phi_0$

当 V 约为 n 微伏时, $\nu \approx 10^8 \text{ Hz}$ (微波区)

V 约为 n 毫伏时, $\nu \approx 10^{11} \text{ Hz}$ (远红外区)

此时结区将以同样的频率向外辐射电磁波,这种现象称为交流约瑟夫森效应, ν 称为约瑟夫森频率.

四、超导的应用

1. 节省能源,贮存电能

由于超导体内电阻等于零,用它代替导体在传输电流中不会有焦耳热的能量损耗,可以节省能源.如将超导体做成环状放入磁场内冷却至零阻温度以下,撤去磁场,其感应电流经几年观察丝毫没有衰减,形成持久电流.由核磁

共振实验结果可知,这种超导电流能维持 10 万年而不至衰减,可以贮存电能.

2. 制成强超导磁体

与常规磁体相比,其优点是耗能小,可达到高的磁场强度.例如用传统方法产生 10T 的磁场十分困难,其耗电功率近 2000 千瓦,每分钟需冷却水约 5 吨,而产生 10T 的超导磁体只需几百瓦功率.目前可制出磁场强度达 18T 的直流超导磁体,这是传统无法制成的.

利用超导技术产生的强磁场,为人类利用海水作为燃料,实现受控热核反应,最终解决能源问题.

• 超导磁体在大型科学装备上的应用

- ① 高能加速器用超导磁体
- ② 探测器用超导磁体
- ③ 核聚变实验装置中用超导磁体

• 超导磁体在生物医学领域中的应用

1973 年,美国劳特伯发表了世界上第一张核磁成像图后立刻引起人们的注意,并预料这技术有可能用于人体组织成像.目前核磁共振成像(MRI)已广泛应用于医学诊断中,用于早期肿瘤和心血管疾病等的诊断.由于核磁共振成像仪需要在一个大空间内有一个高均匀度和高稳定性的磁场,而超导磁体不仅能完全满足这一要求,而且在磁场强度方面比常规磁体有明显的优势,目前世界上医院中的核磁共振成像仪有 80% 以上采用超导磁体.

• 超导磁体在电工、交通领域的应用

利用超导磁体可制成超导电机、磁流体发电机等.它们具有效率高,重量轻、体积小,容量大和稳定性好等优点.

3. 超导磁分离装置

磁分离是利用磁力来进行物质的分离.很早以前,人们就已采用磁分离办法从非磁性的固体或液体中分离、过滤出强磁性颗粒.但只是近 20 年来,在提高分离所需的磁力上有较大突破后,磁分离才得到进一步的发展.而超导技术正给磁分离技术带来更广阔的前景.目前,磁分离技术已经可以进行微弱磁细粒物料的分选,并在贫矿富集、稀有金属及贵金属提

纯、高岭土提纯、煤脱硫以及核废水净化等方面获得应用。

4. 超导磁悬浮列车

随着国民经济的发展,对交通运输的要求亦愈来愈高,迫切需要有时速高达数百公里的快速列车。从60年代后期起,日本就开始执行超导磁悬浮列车计划。超导磁悬浮列车是利用超导直线电机产生升举力、导向力和推进力,使车厢在轨道上悬浮起来,并推动车厢高速前进。

5. 超导量子干涉仪(SQUID)

超导量子干涉仪是利用超导体的宏观量子相干性和超导约瑟夫森效应制成的灵敏度极高的磁敏感器件。用它制成的超导磁强计和各种电磁测量仪器有广泛的用途,如用于地质和地球物理(大地磁测及古地磁研究等)、物理、生物医学(肺磁、脑磁、心磁及神经磁学等)、军事科学(潜艇探测及水下通讯)、计量科学及信息科学等方面的研究。

五、超导研究的展望

超导作为一个正在迅速发展、还没有成熟的学科,它的前景是非常广阔的。通过物理、化学和材料科学等方面的协同研究,可望在下列一些方面取得较大进展。

1. 高温超导电性物理机制的研究

该项研究将是今后一段时间内凝聚态物理中一个起带头作用的学科领域。高温超导材料是与典型的金属、半导体等有原则区别的材料。高温超导体从正常态到超导态的转变是和它的磁性转变、金属绝缘体转变紧密相关联的,这些转变都反映了准二维强关联电子系的特点。高温材料中的杂质、缺陷和各种非均匀性起着十分重要的作用。理论处理上又可能和规范场方法有关。

2. 高温超导材料的研究

该项研究将对材料科学的发展起推动作用。高温超导电性的进一步研究需要高质量的样品,应用开发的关键就在于改进现有的材料工艺和发展新的材料工艺,以及对材料的微观结构和性能的研究。高温超导材料面临的材料科学问题与发展传统材料有原则性的不同。如短的相干长度和强的各向异性及对杂质、缺陷的敏感性都起重要作用。

3. 超导材料的实用化研究

有可能实现在液氮温度下(77K)载流能力相当于液氮温度下一般档次的NbTi线水平的实用化超导材料,这对工业生产、国防技术和科学实验中那些要用到大电流的技术带来巨大的作用和效益,此时零场大电流传输和无源电子元件等方面的应用可获进一步开发。

4. 高温超导在电子学上的应用

① 超导量子干涉器件(SQUID)

用液氮区SQUID代替电磁感应测地磁,2~3年内将有实际效果,实验室用SQUID电磁测量仪器,5~10年会有一定规模,生物磁效应上指望可以应用。

② 在微波技术上的应用

高温超导微波无源器件几年内会有实际应用,随着制造技术的进步,部分微波有源器件、天线、谐振腔等将会应用超导电性。

③ 液氮MOS电路中采用高温超导技术

大规模集成电路技术已进入 $0.5\mu\text{m}$,互连结的电阻将成为进一步改进器件特性的重要问题,期望改用超导体将得到很大改善。

5. 低温超导电性的研究开发

传统的超导电性从理论研究、材料工艺、器件工艺、设计运用都比较成熟,并预计每年仍有10%~20%的市场增长速度,将仍有较大的发展。

○她用物理的情趣,引我们科苑揽胜

○她用知识的力量,助我们奋起攀登

欢迎订阅 1999 年《现代物理知识》