

# 奇妙的超导体

渠基雷 夏洪川

(衡水师专物理系 河北 053000)

在本世纪,由于低温技术和材料技术的发展,人类以自己的智慧和劳动踏入了从未进入的超导态世界. 无论是最初发现的低温超导体,还是后来竞相研制的高温超导材料,只要处于超导态,它们就具有十分奇妙的性质——完全导电性和完全抗磁性.

## 一、电阻为零——完全导电性

1911年荷兰物理学家昂尼斯发现,当水银的温度降低到定值  $T_c = 4.2\text{K}$  左右时,其电阻突然降为零.(其实是极小,电阻率远远小于  $10^{-23}$  欧姆·厘米). 随后他又发现,除铜、金、银与铁等室温下的良导体以外,还有其它许多金属也有此种现象. 1913年他将这种新的物态定名为超导态,温度  $T_c$  被称为超导转变温度. 这就是说,对于许多物质,当其温度  $T > T_c$  时,它处于正常态,其电阻不为零,服从一般金属导体电阻的变化规律;而当温度降低到  $T < T_c$  时,则其电阻降为零,处于超导态,该物质为超导体.

超导体中的电流情况如何呢? 为此,有人曾做过这样的实验:把导体做成圆环放在磁场中,再降温到  $T_c$  以下,使圆环处于超导态,随后把磁场突然去掉. 据电磁感应原理,则超导圆环中立即有感应电流产生. 由于电阻为零,故通过观测发现,这个感应电流居然经过几年的时间也无丝毫的衰减,见图1所示. 这个“永久”电流实验表明,即使在无磁场、无电场或无

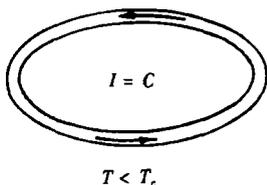


图1 “永久”电流实验

电压的条件下,超导的闭合回路中一旦有电流产生,便会有永久的直流电流存在,超导体显示出一种完全导电性.

## 二、磁感应强度为零——完全抗磁性

1933年迈斯纳等人对围绕球形导体——晶体锡的磁场分布进行了小心的实验测量. 他们惊奇的发现:无论是先降温后加磁场,还是先加磁场后降温,只要锡球过渡到超导态,在锡球周围的磁场都会突然发生变化,磁力线似乎一下子被排斥到超导体之外. 这就是说,不管过渡到超导态的途径如何,只要温度  $T < T_c$ ,超导体内的磁感应强度总是零,即超导体具有完全抗磁性,这后来被人叫做迈斯纳效应.

阿卡捷夫做了一个很有趣的实验,生动地显示出超导体的完全抗磁性. 一个由三条铜腿支撑着的铅碗浸入液态氮中,使铅碗降温进入超导态,再取一块磁性很强的永久磁棒靠近铅碗表面,因棒的磁力线完全被排斥在超导态铅碗之外,结果是足够的排斥力与棒的重力平衡,出现磁棒悬空飘浮的情景,如图2所示. 这种超导磁悬浮现象,在实际中有着诱人的应用前景. 例如,制造磁悬浮列车,由于轨道将列车“顶托”起来,阻力大为减少,车速可提高到每小时500km以上.



图2 磁棒悬浮在超导铅碗之外

## 三、超导态不仅仅取决于温度

自从昂尼斯发现超导体的完全导电性后他就曾企图用超导线圈绕制超导电磁铁,以期产生很高的磁场,但是这一尝试失败了. 他发现,当超导铅线中的电流超过某一临界值  $I_c$  时,铅线由超导态转变为正常态,  $I_c$  叫临界电流. 1914年他又用实验表明,对于温度为  $T < T_c$  的超导体,当外磁场强度  $H$  超过某一值  $H_c$  时超导

态也要被破坏,  $H_c$  叫临界磁场. 可见, 超导态不仅取决于温度, 而且还与外磁场和超导体中的电流有关. 超导转变温度  $T_c$  是在无磁场的条件下, 从正常态过渡到超导态的临界温度. 要使导体处于超导态, 必须将其置于  $T_c$ 、 $I_c$ 、 $H_c$  以下, 任何一个条件被破坏, 超导态都会消失.

#### 四、超导的原因——库柏电子对

人们知道, 金属是由晶格点阵和自由电子组成的. 所谓电阻, 是指晶格对定向运动电子的散射作用. 那么, 为什么超导体的电阻为零呢? 比较圆满而流行的理论是巴丁、库柏、施里弗三人于 1957 年创立的超导微观理论(简称 BCS 理论). 该理论认为, 在超导态情况下, 有一部分正常电子会两两“凝聚”成一个电量为  $2e$  的库柏电子对( $T=0$  时, 电子全部“凝聚”成库柏对). 在库柏电子对中, 两个电子的自旋方向相反, 而且动量大小相等方向相反, 它们通过交换虚声子吸引在一起, 总动量等于常量. 当库柏电子对与晶格相互作用时, 虽两电子的动量可以彼长此消, 但是它们的总动量始终保持不变. 因此库柏电子对几乎不受晶格的散射作用, 宏观上便表现为直流电阻为零.

从二流体模型看, 这库柏电子对是一种超流电子, 它和超流液氦(HeII)相似, 可以无阻挡地通过晶格, 具有奇特的超流动性. 因此, 当  $T < T_c$  时, 超导体中的全部电流是由这种超流电子运输的(正常电子不参与), 并且无需电场力的推动, 超流电子便可在环形超导体中形成永不衰减的直流电流.

同样, 也是由于库柏电子对的原因, 当导体进入超导态时, 超流电子在超导体表面(穿透层)流动, 它在超导体内产生的磁场与外磁场相

抵消, 亦即有磁屏蔽作用, 因而超导体内的磁感应强度总为零, 产生迈斯纳效应.

当两个正常电子“凝聚”成动量为零的库柏电子对时, 其能量比自由地“各行其事”时要低, 因而更稳定. 正因如此, 所以导体由正常态变为超导态时要抽取能量, 降低温度就是实现途径之一. 相反地, 要拆散库柏电子对变为两个正常电子时, 则需要提供能量. 因此, 通过提供热能或电磁能, 当  $T > T_c$ 、 $I > I_c$ 、 $H > H_c$  时, 库柏电子对又可激发为两个单电子, 超导态转变为正常态.

#### 五、量子力学现象

根据量子力学理论可知, 库柏电子对与所有微观粒子一样, 也具有波粒二象性. 其波动性自然是库柏电子对具有波的反射和透射性. 因而, 一些本来能量不足以克服势垒的库柏电子对却具有“穿山”本领, 出现量子隧道效应. 当然, 势垒的宽度应是相当窄的.

当库柏电子对作为超流电子在超导环中做永久流动时, 它就如同氢原子中绕其核作轨道运动的电子一样, 具有能量, 而且能量是量子化的. 这种能量量子化的结果使得被闭合超导环所围绕的磁通量是量子化的. 从理论上可以推算出其磁通量

$$\phi = n\Phi_0 \quad (n \text{ 为任意整数})$$

式中  $\Phi_0$  为磁通量子,  $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-7}$  高斯·厘米<sup>2</sup>. 显然, 超导环内的磁通量子化是一种宏观量子现象. 库柏电子对的量子隧道现象与超导环磁通量子化现象在量子干涉器件中有着很重要的应用, 例如制作非常灵敏的磁场测定仪, 高精度的伏特计等.

#### 月球上蕴藏有丰富的氦-3元素

氦-3是氦的同位素, 含有两个质子和一个中子. 在热核聚变反应过程中, 氦-3同具有一个中子和一个质子的氘(重氢)发生热核聚变, 产生的中子很少, 可以大大降低热核聚变反应堆的放射性危害, 因此这种元素有可能成为 21 世纪热核聚变能的宝贵原料.

据估计, 月球上氦-3元素的总储量大约为 100 万吨, 可为地球上的人类提供能源达数千年之久. 开采时只要对月球土壤加热, 氦-3 元素就会从土壤缝隙中释放出来. 相比之下, 地球上的这种矿物藏只有 20 吨, 而且位于地壳深处, 不易开采.