

奇妙的约瑟夫森效应

渠基雷 夏洪川

(衡水师专 河北 053000)

在对超导体性质与超导原因研究的基础上,物理学家们又对两块超导体之间的薄绝缘层(1nm左右),从理论和实验两方面进行了深入而持久的探索与研究,并取得了丰硕的成果.其中份量最重的要算约瑟夫森效应的发现,此项成果曾使得约瑟夫森(英国人)等三人获得1973年诺贝尔物理学奖.

人们知道,在一般情况下,绝缘层是不会改变本性而显导电性的.但是,在低温条件下,当 $T < T_c$ 时,薄绝缘层对两边超导体中库柏电子对来说,相当于一个很窄的势垒,由于库柏电子对具有量子隧穿本领,所以便有少量电子对从两边进入绝缘层而耦合,从而形成很小的超导隧道电流.此时绝缘层呈现弱超导电性,是一种超导结,被称为约瑟夫森结.

在图1中,若超导结两端的电压为 V_0 ,电量为 $2e$ 的两库柏电子对的耦合系数为 k ,两边超导体中电子对密度皆为 ρ ,则由量子力学理论可以算出超导结的电流密度

$$J_s = J_c \sin \Delta \varphi \quad (1)$$

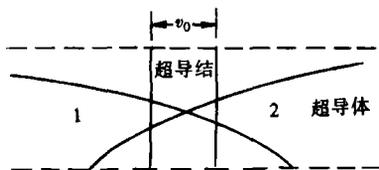


图1

式中 $J_c = 4ek\rho / \hbar$,称为临界超导电流密度, $\Delta\varphi$ 为两边库柏电子对波的相位差,当有外磁场存在时其值为:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \frac{2eV_0}{\hbar}t - \frac{2e}{\hbar} \int_1^2 A dl \quad (2)$$

式中的 $\Delta\varphi_0$ 为初始相位差, A 为电磁势.

由(1)式与(2)式可知,超导结中的电流 I_s

($= SJ_s$, S 为结面积)的变化既与时间有关,又与外磁场有关,并且还要受到临界电流 I_c ($= SJ_c$)的限制.超导结与超导体一样,当其隧道电流 $I < I_c$ 时,绝缘层处于超导态;而当 $I > I_c$ 时绝缘层将转入“正常”态.这种“正常”态实际上是一种“电阻-超导”混合态.其特点是,一方面是正常电子的隧道效应,在结两端产生电压;另一方面是库柏电子对的隧道效应,结中出现交变的超导电流.由此可见影响超导结的因素较多,因而有奇妙的约瑟夫森效应产生.

一、直流约瑟夫森效应

在图2中,若超导结两端不加任何电压,也没有外磁场,即 $V_0 = 0, A = 0$.这时由(1)式与(2)式可知,结中的隧道电流

$$I_s = I_c \sin \Delta \varphi_0 \quad (3)$$

式 $I_c = J_c L_1 L_2$. I_s 在 $\pm I_c$ 之间,是一小直流电流.这种现象称为直流的约瑟夫森效应.

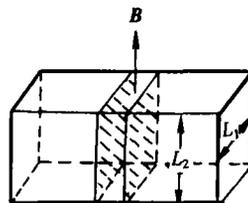


图2

当有外磁场时,若磁场方向与结面平行,则从理论上可以推出流过结的直流电流为

$$I_s = I_c(B) \sin \Delta \varphi_0 \quad (4)$$

式中 $I_c(B) = I_c(0) \left| \frac{\sin(\Phi_I / \Phi_0)}{(\pi \Phi_I / \Phi_0)} \right|$ 为有外加磁

场 B 时的临界电流, $I_c(0)$ 为无外磁场时的临界

电流, $\Phi_0 = h / 2e$ 为磁通量子, Φ_I 为穿过结区的磁通.可见 $I_c(B)$ 的大小随 Φ_I 变化而变化,由实验所得 $I_c - \Phi_I$ 曲线如图3所示.它表明无磁

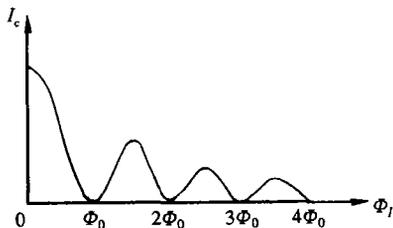


图 3

场时 I_c 最大, 随磁场增加 I_c 下降甚至变为零, 以后又随磁场增加再恢复到较小的极小值, 并且结区磁通 Φ_l 等于磁通量子 Φ_0 的整数倍数时, I_c 等于零. 曲线的形状如同单缝夫琅禾费衍射图样, 因此人们称其为超导量子衍射现象. 从量子力学角度看, 这正是隧穿势垒的两列电子对波长程相干的结果. 显然, 利用这一效应可以测量磁场, 但灵敏度还不够高.

为了制造一种高灵敏度的磁场测量仪, 可将两个完全相同的超导结 a、b 并联, 构成一个双结超导环, 如图 4 所示, 称之为超导量子干涉仪 (SQUID). 若通过环的磁通为 Φ_m , 当超导电流从 1 处分别通过结 a 和结 b 汇合在 2 处时, 则经过两条路径到达 2 处的库柏电子对便会产生量子干涉现象 (AB 效应). 通过理论计算可得其合成电流密度

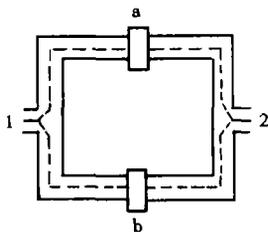


图 4

$$J = 2J_c \sin \delta \cos \frac{e}{\hbar} \Phi_m \quad (5)$$

式中 $\sin \delta$ 为单结衍射因子, $\cos \frac{e}{\hbar} \Phi_m$ 为双结干涉因子. 2 处合成电流 $I(JS)$ 随环路磁通 Φ_m 变化而变化, 并受到单结衍射电子的调制, 类似于双缝衍射-干涉现象. 其 $I-\Phi_m$ 图线略如图 5 所示.

当 $\frac{e}{\hbar} \Phi_m = m\pi$ 时, 2 处电流为最大. 由于磁通量子化, 故 Φ_m 只能按磁通量子 Φ_0 的整数倍作间断

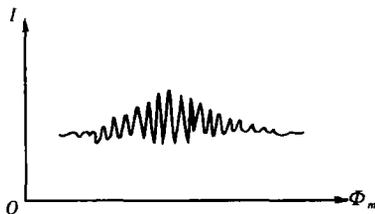


图 5

性变化. 因此, 通过检测电流 I 就能测量磁通的大小. 由于 $\Phi_0 = h / 2e$ 有很精确的公认值, 故利用这种超导量子干涉仪可对弱磁场做高精度的测量 (可分辨 10^{-15}T). 例如, 应用它可对人体的微弱磁场信号进行测量, 从而能探寻人体生命活动中的许多奥秘.

二、交流的约瑟夫森效应

若在超导结两端加一恒定电压 V_0 , 但不加磁场, 通过结的电流大于 I_c , 则结区处于“电阻-超导”混合态. 一方面有电子隧道效应, 另一方面又有库柏电子对的隧道效应. 由 (1) (2) 式可知两电子对波相位差 $\Delta\phi = (2e / \hbar) V_0 t + \Delta\phi_0$, 通过结的电流密度为

$$J_s = J_c \sin[(2e / \hbar) V_0 t + \Delta\phi_0] \quad (6)$$

由 (6) 式可见结中会有一交变的超导电流 ($J_s S$), 其频率为

$$\omega_0 = \frac{2e}{\hbar} V_0, \quad f = \frac{2e}{h} V_0$$

这种现象称为交流约瑟夫森效应. f 为约瑟夫森频率, 它与结两端 V_0 成正比. 当 V_0 为几微伏时, f 位于微波段; 当 V_0 为几毫伏时, f 位于远红波段.

自然, 这种交流电流能发射电磁波, 其量子的能量为

$$\hbar \omega_0 = 2eV_0$$

显然, 这是由库柏电子对穿过绝缘层时能量降低而产生的. 相反地, 若在结上再加上一定频率的振荡电压或用一定频率的电磁波照射, 则会在结中引起直流电流. 从能量观点来看, 这时入射电磁波的能量子 $\hbar\omega_0$ 恰好等于库柏电子对穿过绝缘层所需要的能量 $2eV_0$, 则结中会出现结电压为 $V = V_1 = \hbar\omega_0 / 2e$ 的直流电流. 同样, 用能量为 $n\hbar\omega_0$ 的电磁波照射, 结中便会

大气污染与天空的颜色

伍林 李汝恒 编译

(云南教育学院物理系 昆明 650031)

自然界中绚丽多彩的晚霞和日出东方时的壮观景象是任何一位艺术家都难以描绘的。但是很少人知道我们目睹的大部分落日的颜色是大气污染造成的。城市的落日和空气清新的乡村落日不同。在有些情况下，火山口喷发的灰烬又能引起天空气调色板颜色的改变，使太阳呈现出蓝色或绿色。

在非常洁净、未受污染的大气中，落日的颜色特别鲜明。太阳是灿烂的黄色，同时邻近的天空呈现出橙色和黄色。当落日缓缓地消失在地平线下面时，天空的颜色逐渐从橙色变为蓝色。即使太阳消失以后，贴近地平线的云层仍继续反射着太阳的光芒。因为天空的蓝色和云层反射的红色太阳光融合在一起，所以较高天空中的薄云呈现出红紫色。几分钟后，天空充满了淡淡的蓝色，它颜色逐渐加深，向高空延展。但在一个高度工业化的区域，污染物以微粒的形式悬浮在空中时，天空的颜色便截然不同了。圆圆的太阳呈现出桔红色，同时天空一片暗红。红色明暗的不同反映着污染物的厚度。有时落日以后，西面的天空出现两道宽宽的颜色，地平线附近是暗红色，而它的上方是暗蓝色。当污染格外严重时，太阳看上去就像一只暗红色的圆盘。甚至在它到达地平线前，它的颜色就会逐渐褪去。



为什么在洁净的空气中太阳呈现出黄色，

同时天空呈现出蓝色呢？在19世纪末期瑞利爵士首先对此作出了解释。在地球表面的人们是通过经空气散射的太阳光看天空的。在洁净，未受污染的大气中，大部分的散射是由空气中的分子——主要是氧和氮分子——引起这些分子的大小比可见光的波长要小得多。瑞利的理论指出，在这样的情况下，散射主要影响波长较短的光。因为蓝色位于光谱的后面，所以天空本身呈现出蓝色。太阳光直接穿透空气，在散射过程中它失去许多蓝色，所以太阳本身呈现出灿烂的黄色。

根据瑞利的理论，当光波波长减少时，散射的程度急剧加强。所以光波波长最短的紫光应该散射最强，而靛青、蓝色和绿色的光散射要少得多。那么为什么我们看见的是蓝天，而不是紫色和靛色的天空呢？当散射的光穿过空气时，吸收使它丧失了许多能量。这些能量损失对于波长很短的紫光和靛色光是巨大的。虽然它们散射很强烈，同时它们也被强烈的吸收了。我们所目睹的天空颜色是光谱中蓝色附近颜色的混

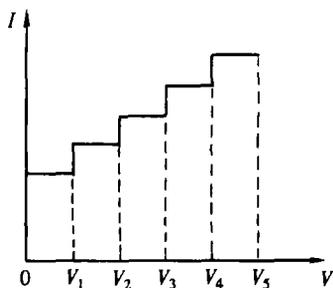


图 6

出现结电压为 $V = V_n = n \frac{\hbar\omega_0}{2e}$ 的直流电流。于是，结的伏安特性曲线便呈现夏皮罗台阶状，如图6所示。这表明，结电压也是量子化的。由于 e, h 均为基本物理常数，精度很高，而微波频率又可高精度地测定，因此，利用 V_n 可实现精确的电压标准（约瑟夫森电压标准）。1990年元旦，国际计量局已将之颁布用来定义新的电压标准（伏特）。据此，又可制作高精确度的伏特计。