

微弱信号检测讲座

第五讲 超导电子器件在微弱电磁信号检测中的应用

杨沛然

(中国科学院物理研究所)

超导电子器件是一种低温电子器件，它是基于约瑟夫森 (Josephson) 效应而研制成功的一种新型电子器件。它的基本结构如图 1 中的插图那样，是一个具有三层结构的二端器件，其中 S_1 和 S_2 是两块超导体，中间由一薄层绝缘体隔开，这层绝缘体的厚度只有几 nm。

一、超导电子器件的特性

1. 它的直流 $I-V$ 曲线如图 1 中的曲线 a 所示。如果逐渐增大通过此二端器件的电流，那么在开始时，器件两端电压为零；当通过的电流达到 I_c 时，电压从零跳到 V_g ；当电流继续增大时，电压沿着一条二次曲线上升。如果在此二端器件上加一个直流磁场，则 I_c 会减小；当磁场从零增加到某个值 H_1 时， I_c 则会降到零。此时，该器件的 $I-V$ 曲线如图 1 中的曲线 b 所示。

2. 如果磁场从 H_1 继续增大， I_c 又会从零增大，周而复始，呈现周期性变化。其变化周期由穿过结区的磁通决定。磁通每增大一个磁通量子 ϕ_0 ， I_c 即发生一次周期变化，如图 2 所示。

3. 当通过该二端器件的直流电流大于 I_c 时，器件两端出现直流电压 V ，同时在结区内有一高频振荡电流，其振荡频率 f 与直流电压 V 之间有下列关系：

$$f = \left(\frac{2e}{h}\right) V, \quad (1)$$

式中 e 为电子电荷， h 为普朗克常数。与此同时，还伴随有频率为 f 的电磁辐射，不过，辐射的功率很小，一般小于 $10^{-9}W$ 。

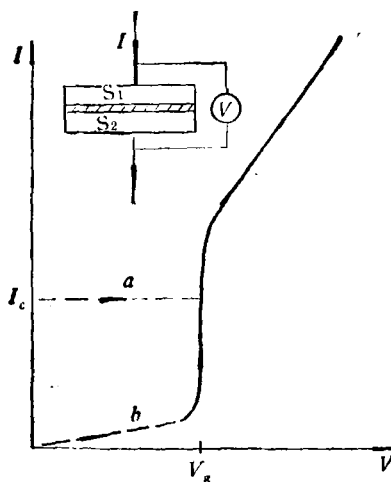


图 1 超导隧道结的 $I-V$ 曲线

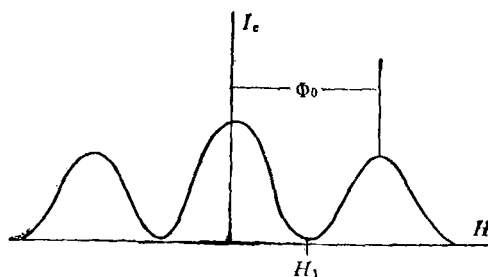


图 2 超导隧道结 I_c 随磁场的变化

4. 这种超导电子器件也能吸收电磁波。当它吸收电磁波后，在其直流 $I-V$ 曲线上引起恒电压、电流台阶，如图 3 所示。台阶处的电压为

$$V_n = n \frac{h}{2e} f_0, \quad (2)$$

f_0 为所吸收的微波频率， n 为整数。

由于超导电子器件具有上述特点，因此它在电子学领域的用途是很大的。这里只介绍它在微弱电磁信号检测方面的一些应用。

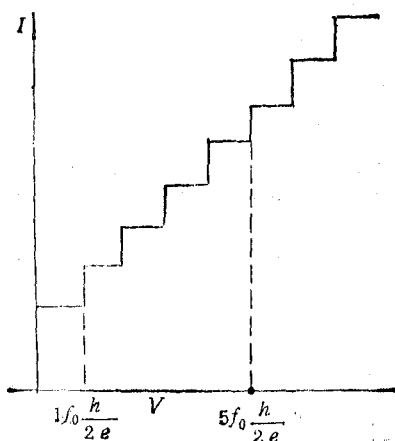


图3 微波辐照时超导隧道结的 I - V 曲线

二、弱磁场检测

直流和低频磁场的检测是一项基本的测量技术。随着科学技术的进步，要求测量的灵敏度愈来愈高。可用于弱磁场测量的方法和仪器有许多种，但以超导电子器件做成的超导磁强计的灵敏度为最高。

超导磁强计是以超导量子器件作为磁敏感元件制成的一种磁测量仪器。超导量子器件有两种：一种是射频超导量子器件(RF-SQUID)；另一种是直流超导量子器件(DC-SQUID)。尽管这两种超导量子器件的工作原理不尽相同，但它们对直流磁场都有周期响应，同样都可用于灵敏磁测量。这里我们只介绍直流超导量子器件。

直流超导量子器件的基本构造如图4所示。它是由超导体把两个超导隧道结连成一个闭合环路而组成。

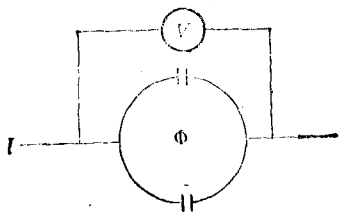


图4 直流超导量子器件

设 I 是通过这个并联双结的电流， V 是结两端的电压， Φ 是穿过直流超导量子器件环的磁通量， L 是环电感，则用一个等效电路即可推导出描述直流超导量子器件电特性的微分方程式^[1]：

$$j = \frac{(\theta_1 - \theta_2 - 2\pi\phi)}{\pi\beta}, \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{2} \frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{1}{2} \frac{d\theta_2}{d\tau}, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_1}{d\tau} = \frac{i}{2} - j - \sin\theta_1, \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_2}{d\tau} = \frac{i}{2} + j - \sin\theta_2, \quad (6)$$

式中 ϕ 是归一化磁通， $\phi = \Phi/\Phi_0$ ； v 是归一化电压， $v = V/I_0 R$ ； i 是归一化电流， $i = I/I_0$ ； j 是归一化环流， $j = J/I_0$ ； τ 是归一化时间， $\tau = t/(\Phi_0/2\pi I_0 R)$ ； θ_1 是第一个并联结的位相差； θ_2 是第二个并联结的位相差； β 是调制参量， $\beta = 2 I_0 L/\Phi_0$ ； R 为结电阻； I_0 为结的临界电流， J 为环绕 SQUID 环流动的电流， $J = (I_2 - I_1)/2$ 。

上面的(3),(4),(5),(6)各式均无法得到分析解，因此有人用数值计算法解出上列各式，并利用一组曲线表示直流超导量子器件的电特性。

1. v - τ 曲线

这组曲线表示直流超导量子器件的输出电压随时间的变化，如图5所示。

当通过 DC-SQUID 的电流 $I < I_0$ 时，输

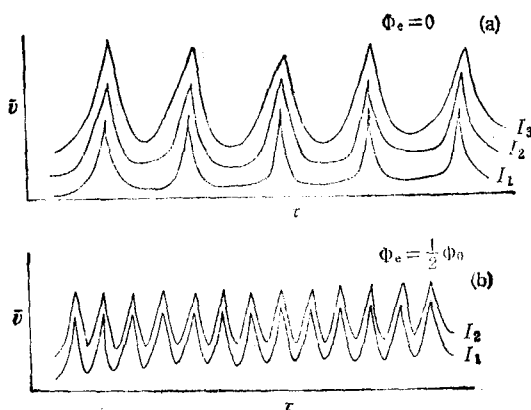


图5 DC-SQUID 的电压-时间特性

出电压 v 为零。当 $I_1 > I_0$ 时, DC-SQUID 的输出电压为一系列尖峰。当通过的电流 $I_2 > I_1$ 时, 所对应的一族尖峰向电压大的方向移动, 如图 5(a) 所示。图 5(a) 对应于 $\Phi = 0$ 。当 $\Phi = 0.5\Phi_0$ 时, 尖峰的周期变小, 如图 5(b) 所示。

2. $i-\bar{v}$ 曲线

此处 \bar{v} 代表直流超导量子器件的直流输出电压。将图 5(a) 这族曲线对时间求平均值, 即可得到对应于 $\Phi = 0$ 的一条 $i-\bar{v}$ 曲线。同样, 对图 5(b) 的一族曲线求时间平均值, 也可以得到另一条 $i-\bar{v}$ 曲线。它们分别对应于图 6 中的曲线(a)和(b)。

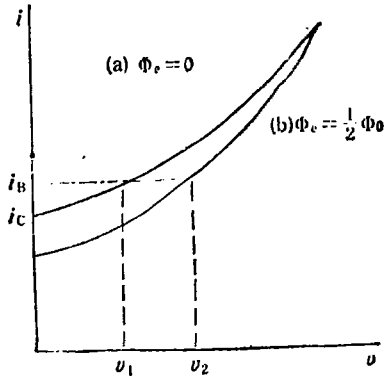


图 6 DC-SQUID 的直流 $i-\bar{v}$ 曲线

从图 6 还可以看出, 如果我们把直流超导量子器件偏置在电流 i_B, i_B 稍大于它的临界电流 i_c , 则它有一个直流输出电压 \bar{v} 。 \bar{v} 对不同的外磁场有不同的值。如使 Φ 从零开始单调上升, 则当 $\Phi = 0$ 时, $\bar{v} = \bar{v}_1$; $\Phi = 0.5\Phi_0$ 时, $\bar{v} = \bar{v}_2$; 此后, 当 Φ 从 $0.5\Phi_0$ 进一步增大到 Φ_0 时, \bar{v} 又从 \bar{v}_2 回到 \bar{v}_1 。这样, Φ 的单调变化就会引起直流超导量子器件的输出电压周期变化。磁通每改变一个磁通量子 Φ_0 , 电压就会变化一个周期, 如图 7 所示。

3. DC-SQUID 的磁通灵敏度

对 $\bar{v}-\Phi$ 曲线求偏导数, 则可以得到一个表征 DC-SQUID 重要特性的参量, 称为磁通转换函数。在一般情况下, 它的表达式是比较复杂的, 而在

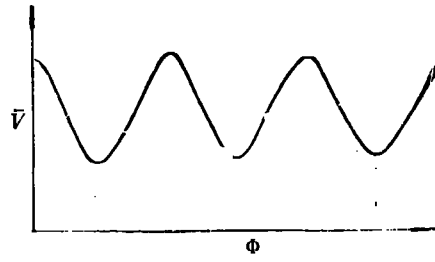


图 7 DC-SQUID 输出电压随磁通的变化

$$\beta_c = \frac{2\pi I_0 R^2 C}{\Phi_0} = 1 \quad (7)$$

(其中 β_c 是迴滞参量, C 是隧道结电容)和

$$\Phi = \left(n + \frac{1}{4}\right)\Phi_0 \quad (8)$$

的条件下, 磁通转换函数可用下式表示:

$$\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial \Phi}\right)_i = \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial I_c}\right)_i \cdot \left(\frac{dI_c}{d\Phi}\right), \quad (9)$$

式中

$$\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial I_c}\right)_i \doteq \frac{R}{2}, \quad (10)$$

$$\left(\frac{dI_c}{d\Phi}\right) \doteq \frac{2\Delta I_c}{\Phi_0}. \quad (11)$$

当固定 DC-SQUID 的环路电感 L , 增大隧道结的临界电流 I_c , 并使 $\beta \geq 40$ 时,

$$\Delta I_c \doteq \frac{\Phi_0}{L}. \quad (12)$$

在这种情况下,

$$\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial \Phi}\right)_i \doteq \frac{R}{L}. \quad (13)$$

当固定 I_c , 减小 L , 使 $\beta \ll 1$ 时, 则

$$\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial \Phi}\right)_i \doteq \frac{\beta R}{L}. \quad (14)$$

(13)和(14)式表明, DC-SQUID 实质上是一个磁通电压转换器, 在一般情况下, 磁通电压转换函数 $\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial \Phi}\right)$ 可达到每个磁通量子 Φ_0 为 $10^{-4}-10^{-5}$ V。现在, 电压检测技术可以容易达到 10^{-9} V 的检测灵敏度, 这意味着人们可以得到优于 $10^{-4}\Phi_0$ 的磁通检测灵敏度。现代的超导磁强计就是基于这一原理制成的。它由两部分组成: 第一部分就是用这种 DC-SQUID 构成的磁敏感元件, 它可以把检测的磁信号转换成电压信号; 第二部分是小电压测量装置, 用

来测量 DC-SQUID 器件的输出电压。目前，商品超导磁强计的灵敏度已优于 10^{-13} T，而实验室的结果更好，可达到 10^{-15} T。

由于超导磁强计的灵敏度很高，用它可以测量过去无法测量的微弱磁信号，例如测量人的心磁和脑磁信号，还可用于地质探矿和岩石样品磁性测量。在军事上，它被用来探测水下目标和进行海岸对潜艇的水下通讯。在科研领域中，它既可用于测量物质磁性质，还可用于检测引力波和磁单极子。

三、微小电压检测

目前，利用半导体器件制成的电压表的分辨率可达 10^{-9} V，但用超导电子器件做成的电压表的分辨率可达 10^{-12} V 以上。图 8 是这种超导电压表的示意图，它由超导量子器件、室温小电压测量仪表、反馈网络和小电压输入电路四部分组成。

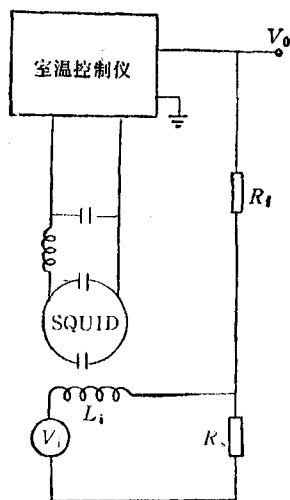


图 8 超导电压表示意图

小电压测量回路是由一个阻值很小的标准电阻、一个与超导量子器件耦合的超导小电感和待测信号源串联而成。待测电压加到输入回路时，在输入回路产生电流。该电流耦合到超导量子器件上以后，超导量子器件输出一个电压。这个电压再经室温小电压测量仪表放大，然后再经反馈网络通过 R_f 加到输入回路上去，以补偿测量电压在输入回路中引起的电流。达

到平衡时，反馈网络上 R_f 上的电压恰好等于待测电压，即
$$V_i = \frac{R_i}{R_f} V_0 \quad (15)$$

V_0 是室温小电压测量仪的输出电压，而 V_i 即为待测的小电压。

一般情况下， $R_i/R_f = 10^{-8}$ 。如果 V_0 的噪声电平低于 10^{-4} V，则上述测量方法可以得到 10^{-12} V 的测量灵敏度。影响测量的主要噪声来自测量回路本身。如果信号源内阻为 R_i ，为了保证有 10^{-12} V 的测量灵敏度，信号源的温度 T_i ，必须满足 $T_i \cdot R_i \leq 10^{-2} \Omega \cdot K$ 的条件。

这种微小电压测量装置的频率响应也主要取决于测量回路。一般地说，测试回路的电感 L_i 为 10^{-6} H。如果信号源温度为 4.2 K，为保证 $T_i \cdot R_i \leq 10^{-2} \Omega \cdot K$ ， R_i 应为 $10^{-2} \Omega$ 量级。这样，测量回路的时间常数 L/R 应为 10^{-4} s 量级，即测试回路的频率响应为 10 kHz。小电压测量装置具有如此高的灵敏度和宽频带，这是其他任何电压测量系统无法达到的。

四、超导微波混频器及接收机

毫米波、亚毫米波微波信号的检测在卫星通信、射电天文学和雷达等重要领域有广泛的应用前景。制造微波混频器有许多技术方案可供选择，但就其综合技术指标而论，超导电子器件制成的微波混频器的优势是明确的。从理论上讲，利用约瑟夫森结做成的微波混频器可工作在 2000 GHz 的频段，现在人们已经做成 700 GHz 的超导微波混频器。这种超导微波混频器不但工作频率高，而且噪声也很低，并在卫星通讯和射电天文学方面得到实际应用。

前面讲到，外加一个直流磁场可以把约瑟夫森结的超流压到零，此时，它的 $I-V$ 曲线由图 1 中的曲线 a 变到曲线 b，曲线 b 与常见的单电子隧道曲线相似。如果再加微波辐照，在 $I-V$ 曲线的陡峭上升处会出现台阶结构。当把约瑟夫森结偏置在这些台阶处进行混频时，即可得到较大的变频效率和较低的噪声温度。目前，用这种办法做成的超导微波混频器，工作在 36 GHz 时的噪声温度为 3.8 K，变频增益大

于 1. 这个结果接近于混频器的量子极限噪声 $T_Q^{(12)}$,

$$T_Q = \frac{\hbar\omega}{k \ln 2} \doteq 2.5K, \quad (16)$$

式中 k 是玻耳兹曼常数, ω 是角频率, \hbar 是普朗克常数除以 2π .

这种混频器目前存在的一个主要缺点是其动态范围不够大. 这是因为在约瑟夫森结混频器中, 动态范围是由微波引起的感应台阶的宽度决定. 按照约瑟夫森关系式, 台阶宽度

$$\Delta V = \frac{\hbar}{2e} f.$$

当 f 为 36 GHz 时, ΔV 为 70 μ V.

如果信号过大, 混频器的变频效率变差, 而且不再是线性的, 则会限制信号功率的上限, 使这种混频器在诸如雷达等一些大动态信号检测方面的应用遇到困难. 目前, 人们正试图用多个约瑟夫森结串联的办法扩大这种混频器的动态范围. 用约瑟夫森结还可以做成视频检测器.

虽然它的工作原理与约瑟夫森结微波混频器不同, 但它也具有宽频带的特点, 故可以用在亚毫米到红外波段的弱信号检测, 但其噪声特性比上面讲到的准粒子混频器要差一些.

总之, 用超导电子器件做成的微弱信号检测装置所具有的高灵敏度和宽频带的优点已为人们所承认, 并已在某些重要领域达到实用化程度, 但由于需要使用液氮作冷源来冷却这种超导电子器件, 因而大大限制了它的广泛应用. 最近发现的高临界温度氧化物超导体为新型超导电子器件的研究带来了希望. 一旦用这种新材料制成的超导电子器件达到实用化, 它在工程技术上的应用前景不可估量.

- [1] J. Clarke et al., *J. Low Temp. Phys.*, **25**(1976), 99.
 [2] D. W. Face et al., *Appl. Phys. Lett.*, **48**(1985) 1098.

(上接第40页)

长率将达 30%.

2. 光纤传感器的发展趋势

实践表明, 光纤传感器具有许多独特的优点, 但仍面临着传统传感器及其他新型传感器(如生物传感器等)的严重挑战. 要能在激烈的竞争中取胜, 除需要进一步提高产品的性能和降低成本外, 还必须开拓新的应用领域. 因此, 在光纤传感技术领域里, 很可能会出现下列发展趋势.

(1) 集成化光纤传感器: 在光纤传感器中, 除光纤外, 其他的光学元件、信号处理系统, 甚至光源和光检测器都采用集成回路. 这样不仅可以降低生产成本, 而且可以提高产品性能. 目前已有关于集成化光纤陀螺的报道.

(2) 多功能全光纤控制系统: 它是通过一个光纤网络, 把各个具有不同功能的光纤传感器获得的信息馈送到中心计算系统, 进行处理, 作出判断, 输出各种控制信号, 对生产过程进行合理的控制. 它主要应用于飞机、舰船、电厂和生产过程的控制等.

(3) 全光纤远距离监测系统: 充分发挥光纤传输损耗小的优点, 发展适用于环境保护、煤矿瓦斯和核辐射监测等的全光纤远距离监测系统.

(4) 分布式光纤传感系统: 实际上, 功能光纤上的任何一点对被测量都有敏感作用, 因此, 利用光纤可构成分布式光纤传感系统, 确定被测量的空间分布. 例如, 可连续地监测桥梁、水坝、高压容器和飞行器等的主要大型构件的应变分布以及电力变压器、发电机、锅炉和高压电缆等设备中的温度分布.

(5) 光纤式测量仪表: 目前绝大部分测量仪表都是电磁仪表, 其致命弱点是易受电磁干扰, 灵敏度和精度均较低. 而用光纤敏感元件作为探头的光纤式测量仪表, 则无此毛病, 因此它将会发展成为较理想的新一代仪表.

- [1] B. 卡尔肖著, 高希才等译, 光纤传感器与信号处理, 成都电讯工程学院出版社, (1986年).
 [2] 大越孝敬, 光ファイバセンサ, オーム社, (1986年).
 [3] 高希才, 压电与声光, No. 3(1986), 13.
 [4] T. G. Giallorenzi et al., *IEEE Spectrum*, No. 9(1986), 44.