

专题: 超导及其应用

## 超导量子干涉器件\*

郑东宁<sup>1)2)3)†</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 物理科学学院, 北京 100049)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2020年12月15日收到; 2020年12月29日收到修改稿)

超导现象是一种宏观量子现象. 磁通量子化和约瑟夫森效应是两个最能体现这种宏观量子特性的物理现象. 超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是利用这两个特性而形成的超导器件. SQUID 器件在磁信号灵敏探测方面具有广泛的应用. 本文简要介绍低温超导和高温超导 SQUID 器件的相关背景和发展现状以及应用领域.

关键词: 超导器件, 约瑟夫森效应, 超导量子干涉器件

PACS: 85.25.-j, 74.50.+r, 85.25.Dq

DOI: 10.7498/aps.70.20202131

## 1 引言

根据 BCS 理论, 超导体中的载流子在临界温度  $T_c$  以下会形成库珀对, 并发生凝聚形成一种宏观有序态. 这种有序态可以用一个宏观波函数 (序参量) 描述. 事实上, 在 BCS 理论出现之前, London<sup>[1]</sup> 就指出超导是一种宏观量子现象. 他还进一步预言一个闭合超导环所包含的磁通是量子化的, 是磁通量子  $\Phi_0$  的整数倍, 其中磁通量子是普朗克常数  $h$  除以载流子的有效电荷<sup>[1]</sup>. 这一预言后来得到了很好的实验验证, 实验结果显示  $\Phi_0 = h/2e \approx 2.0678 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ <sup>[2,3]</sup> (这里  $e$  为电子电荷). 分母为  $2e$  表明了超导体中的超导载流子是两个电子配对形成的库珀对. 高温超导材料发现以后, 实验上也很快验证了高温超导闭合环路中的磁通同样是量子化的<sup>[4]</sup>, 最小单元也是  $\Phi_0$ . 磁通量子化是由超导宏观波函数的单值性决定的, 即绕环路一圈回到原点后波函数的值不变, 相位变化须是  $2\pi$  的

整数倍.

1962 年约瑟夫森预言<sup>[5]</sup>, 被一层很薄绝缘体分开的两个超导体形成的超导-绝缘-超导 (S-I-S) 隧道结中, 两侧的超导波函数会穿过绝缘层彼此重叠, 使得库珀对可以相干地隧穿通过绝缘层, 也就是说超导电流可以无阻地流过隧道结. 超导电流  $I_s$  和绝缘层两端超导体波函数相位差  $\varphi$  之间的关系为

$$I_s = I_c \sin \varphi. \quad (1)$$

如果结上有电压  $V$ , 则  $\varphi$  随时间的变化率为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} V. \quad (2)$$

约瑟夫森的理论预言很快为实验所证实<sup>[6]</sup>, 这一效应也就称之为约瑟夫森效应. 进一步的研究显示约瑟夫森效应不但在 S-I-S 隧道结上可以观察到, 在其他形式的弱连接结上也可观察到.

根据 (1) 式和 (2) 式很容易计算得到一个约瑟夫森结的耦合能为

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2016YFA0300600, 2017YFA0304300) 和中国科学院战略性科技先导专项 (批准号: XDB28000000) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dzheng@iphy.ac.cn

$$E_J = \frac{\hbar I_c}{2e} (1 - \cos \varphi). \quad (3)$$

另外,也可看出约瑟夫森结可以看作一个非线性电感,电感值为

$$L_J = \frac{\hbar}{2eI_c \cos \varphi} = L_c \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (4)$$

自上世纪 60 年代约瑟夫森效应和磁通量子化现象被实验所证实以来,基于这两种现象的超导器件和应用不断出现,在许多领域发挥着重要的作用.本文介绍的超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是其中一个主要的方面.关于 SQUID 的研究已有五十多年的历史,是一个发展相对成熟的方向,有很多的综述文献和书籍可供参考<sup>[7-14]</sup>.

## 2 基本原理

SQUID 器件通常由包含一个或两个约瑟夫森结的超导环路构成.一般称前者为射频 SQUID(RF-SQUID),后者为直流 SQUID(DC-SQUID).当穿过 SQUID 环路的磁通  $\Phi$  发生变化时, SQUID 器件的电感 (射频 SQUID) 或临界电流 (直流 SQUID) 会发生相应的变化,因此可以用射频和直流方法分别来探测外界磁通变化的影响.利用磁通耦合器,任何可以转化为穿过 SQUID 环路磁通的被测量都可以利用 SQUID 传感器来测量.例如,用 SQUID 可以做成极其灵敏的磁强计或电流传感器等.屏蔽电流或穿过 SQUID 超导环路的磁通使 SQUID 电压-磁通或电流-磁通曲线出现周期性振荡,振荡的周期就是一个磁通量子  $\Phi_0$ .

图 1 是一个 DC-SQUID 的示意图.假定流过 SQUID 的电流是  $I$ ,超导环路中的环流是  $J$ ,两个约瑟夫森结的临界电流都是  $I_{c0}$ ,相位差分别是  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ .根据约瑟夫森方程,流过两个结的电流

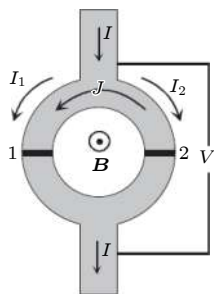


图 1 DC-SQUID 示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 1. Schematic drawing of the DC-SQUID configuration<sup>[7]</sup>.

满足如下关系:

$$\frac{1}{2}I + J = I_{c0} \sin \varphi_1, \quad (5)$$

$$\frac{1}{2}I - J = I_{c0} \sin \varphi_2. \quad (6)$$

根据超导环路量子化关系 (假定超导环路电感很小,可以忽略)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}. \quad (7)$$

定义 SQUID 的相位差为  $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$ ,根据 (5) 式—(7) 式可以得到

$$I = 2I_{c0} \left| \cos \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \pi \right) \right| \sin \varphi, \quad (8)$$

$$J = I_{c0} \sin \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \pi \right) \cos \varphi. \quad (9)$$

从方程 (8) 可以看出, SQUID 等效于一个临界电流可变的约瑟夫森结,临界电流

$$I_c = 2I_{c0} \left| \cos \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \pi \right) \right| \quad (10)$$

随磁通周期变化.显然,出现这种现象的原因是磁通产生的环流电流使得 SQUID 环路两侧约瑟夫森结上的相位差不同而引起干涉效应,这也是这类器件称为量子干涉器件的原因. Jaklevic 等<sup>[15]</sup>最早在实验上观察到这种量子干涉现象.

在大多数应用中, SQUID 器件中超导环路的几何电感  $L$  不能忽略.通常用屏蔽参数  $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0$ ,来描述环路几何电感的影响.图 2 所示的是不同  $\beta_L$  参数值对应的磁通对 DC-SQUID 器件临界电流调制的情况.

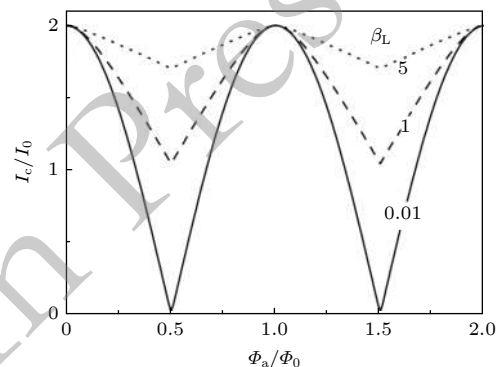


图 2 不同屏蔽参数  $\beta_L$  对应的磁通对 DC-SQUID 器件临界电流调制的情况<sup>[7]</sup>

Fig. 2. Critical current of the DC-SQUID vs. applied flux for 3 values of the screening parameter  $\beta_L$ . Junction parameters are assumed to be identical<sup>[7]</sup>.

由于磁通对 SQUID 临界电流的调制, 当 SQUID 电流偏置在略大于临界电流的状态时, SQUID 两端的电压也会受磁场调制而在最大值和最小值间以  $\Phi_0$  为周期变化. 图 3 是根据 DC-SQUID 的等效电路给出的不同外加磁通  $\Phi_a$  下的  $I-V$  曲线, 以及对应的结上电压随磁通变化的情况. 其中约瑟夫森结并联的电容  $C$  是结超导电极和绝缘层形成的电容, 电阻  $R$  是外加的并联电阻或本征的并联电阻. 合适的  $R$  值保证约瑟夫森结的  $I-V$  曲线无回滞. 电压的变化幅度表明了磁通对 SQUID 电压的调制的大小, 被称为电压调制深度. 而电压变化与磁通变化之比  $\Delta V/\Delta\Phi$  被称为 SQUID 的传递函数. 因此, SQUID 本质上是一个磁通电压的转换器.

SQUID 可以测量远远小于一个磁通量子的磁通. 但是由于 SQUID 的环孔很小, 因此对磁场强度的测量并不灵敏. 实际应用中, 一般将 SQUID 与不同形式的探测线圈耦合起来构成 SQUID 磁强计或梯度计. 磁强计和梯度计可以测量很微弱的磁场或磁场梯度信号, 因此可以应用在很多领域.

除传统的直流和射频 SQUID 器件外, 另外一种称为超导量子干涉滤波器 (superconducting quantum interference filter, SQIF) 的器件近年也受到很多关注. 这种器件包含许多连接在一起的 SQUID 构成的阵列, 其中每个 SQUID 环路的大小不一,

这样使得各个 SQUID 对应的磁通电流干涉曲线在零磁通以外的区域相互抵消, 而只在零磁通的区域出现一个峰. 因此, 与传统 SQUID 相比, 电压-磁通曲线不再是周期变化的, 而是只出现一个峰. 这种器件可以用来进行磁场绝对值的测量<sup>[16]</sup>.

由于 SQUID 电压-磁通曲线是非线性的, 通常需要采用反馈电路来得到线性化的输出, 从而实现磁通测量. 这样的基本电路称为磁通锁定反馈电路 (flux-locked feedback loop 或 flux-locked loop, FLL). 图 4 给出了两种最常用的 DC-SQUID 读出电路的示意图. 其中左图是直接读出 FLL 读出电路, 右图是磁通调制的 FFL 读出电路. 虽然前一种读出电路更加简单, 但是在 SQUID 发展的历史上, 却是第二种磁通调制读出电路最早被广泛使用, 因为这种方式工作稳定, 噪声低. 磁通调制可以有效地减少 DC-SQUID 偏置电流噪声以及前置放大器 (Preamplifier) 低频噪声的影响. 而且置于 SQUID 和前置放大器之间的低温电压变压器可以放大 SQUID 上的对应磁通调制的交变电压信号, 减少了前置放大器本身噪声的影响. 磁通调制读出电路的缺点是电路相对复杂, 工作带宽受到磁通调制频率以及电压变压器的限制. 一般常规的磁通调制读出电路工作的工作频率在约 100 kHz 以内. 通过电路改进, 工作频率可以提高到几 MHz. 随着多通道 SQUID 系统的发展, 以及半导体放大器性能的不

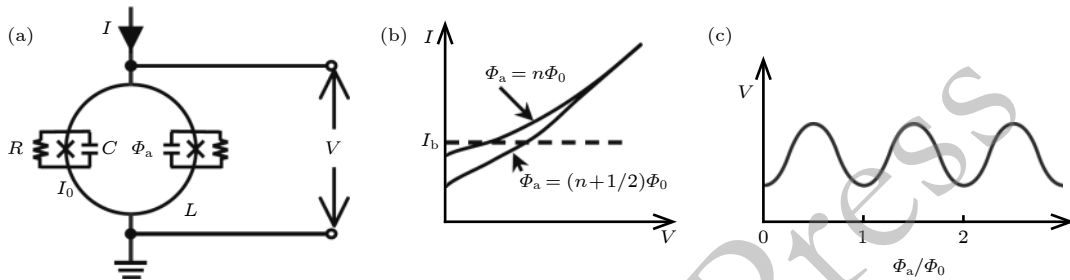


图 3 DC-SQUID (a) 等效电路示意图; (b) 磁通分别为整数个和半整数个  $\Phi_0$  时的  $I-V$  曲线; (c) 电压-磁通曲线<sup>[7]</sup>

Fig. 3. The DC-SQUID: (a) Schematic electric circuit; (b) current-voltage characteristics at integer and half-integer values of applied flux; the operation point is set by the bias current  $I_b$ ; (c) voltage vs. flux  $\Phi_a/\Phi_0$  for constant bias current<sup>[7]</sup>.

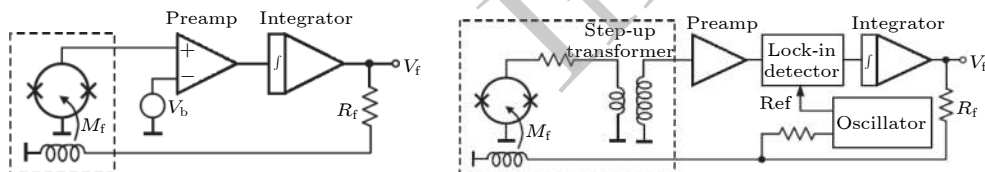


图 4 DC-SQUID 的直接读出 FLL 读出电路 (左) 和磁通调制的 FFL 读出电路 (右)<sup>[17]</sup>

Fig. 4. DC-SQUID readout FLL circuit. Basic FLL circuit with direct readout (left) and with flux modulation (right)<sup>[17]</sup>.

断提高, 直接读出 FLL 电路由于其电路结构简单、工作带宽大, 而逐渐得到广泛应用.

针对实际应用, 人们还发展出了多种其他形式的读出电路, 可根据噪声、动态范围、频率响应等方面的要求选取合适的读出电路 [7,14,17]. 目前利用常规的半导体读出电路, 可以检测  $10^{-6}\Phi_0$  大小的磁通变化.

图 5 所示的是 RF-SQUID 和用于读出的谐振电路以及前置放大器的等效电路示意图. 前面已经提到约瑟夫森结可看成一个非线性电感. 当外加磁通变化时, RF-SQUID 环路的电感发生变化导致与其耦合的谐振电路的谐振频率和相位等发生变化. 因此可以通过测量谐振电路的输出电压来测量 RF-SQUID 感受的磁通. 同样可以采用磁通锁定反馈电路来获得线性化的输出. 需要指出的是, 目前绝大多数应用都采用 DC-SQUID 作为探测器件. 低温超导 RF-SQUID 应用方面的报道较少, 高温超导 RF-SQUID 有可能在一些方面得到应用.

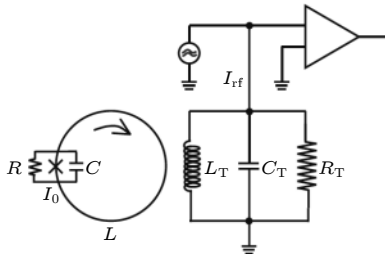


图 5 RF-SQUID 和用于读出的谐振电路以及前置放大器的等效电路示意图 [7]  
Fig. 5. Schematic representation of the RF-SQUID, with tank circuit and preamplifier [7].

### 3 噪声特性

SQUID 器件本身的噪声主要分为三种: 分路电阻上的热涨落噪声 (Johnson 噪声)、散粒噪声和  $1/f$  噪声. 其中热涨落噪声是由于电子的热运动产生的在分路电阻两端的噪声电压. 散粒噪声是由于电流中运动电子数目的起伏导致的噪声电流.

散粒噪声和热涨落噪声都与频率无关, 被称为白噪声. 一般散粒噪声只有在电流很小时才能表现出来, 对于高温超导器件来说, 热涨落噪声远远大于散粒噪声的影响, 因此一般不考虑散粒噪声的影响.

$1/f$  噪声的方均噪声电压频谱密度与频率的倒

数成正比, 因此被称为  $1/f$  噪声.  $1/f$  噪声起源还不完全清楚, 但有两个来源可以确定: 一是临界电流和结电阻的涨落, 二是源于薄膜中被钉扎的磁通的运动. 第一种来源的  $1/f$  噪声可以通过磁通调制和偏置电流反转技术来抑制 [7,17]. 抑制第二种噪声需要采用高质量的超导薄膜和对 SQUID 进行特殊的设计来减少磁通钉扎. 一种常用的方法是将器件中超导薄膜部分制备成网格状, 使磁通局限在网格的孔中 [18].

如果要用 SQUID 测量磁通, 热噪声的能量必须远小于磁通的能量, 否则被测量的磁通信号就会被热噪声掩盖. 这样就对 SQUID 的电感有限制, 不能太大. 通常在 SQUID 设计时, 会考虑工作温度和屏蔽参数  $\beta_L \sim 1$  等条件, 再根据约瑟夫森结无回滞条件  $\beta_C < 1$  来确定 SQUID 电感、结的临界电流和正常态电阻等参数, 以使 SQUID 处于最佳的工作状态 [7,19].

对低温 SQUID 磁强计, 白噪声频率区域典型的磁场噪声水平为几个  $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ . 高温超导 SQUID 磁强计的噪声水平变化比较大, 受工艺参数的影响明显. 高质量器件白噪声区间的噪声可以低于  $50 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ . 此外, 高温 SQUID 磁强计的  $1/f$  噪声比低温器件显著大, 因此低频噪声增加较多. 采用偏置电流反转的方式可以减小由于结的临界电流涨落导致的  $1/f$  噪声.

原则上, 高温超导 SQUID 器件工作在  $77\text{K}$ , 相比于工作在液氦温度的低温 SQUID 器件, 热噪声大了约 20 倍, 因此高温超导 SQUID 器件呈现出高的噪声水平似乎也不奇怪. 但是根据 SQUID 噪声的理论分析, 磁通白噪声与 SQUID 电感  $L$ , 结电容  $C$  等有如下关系:

$$S_\Phi \approx 32k_B T L \left( \frac{LC}{\beta_C} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

这里  $\beta_C = 2\pi I_C R_n^2 C \approx 0.4$  是约瑟夫森结的 Stewart-McCumber 参数. 高温超导结的  $\beta_C$  参数基本不随结的大小变化, 而低温结中正常态电阻  $R_n$  通常由外加并联电阻决定, 因此  $S_\Phi$  与结电容  $C$  无关. 基于这些考虑, 由于高温超导约瑟夫森结的电容很小, 因此高温超导 SQUID 器件仍然可以实现低的噪声 [20]. 需要注意的是, 上述讨论不适用于冻结磁通跳跃、结区载流子俘获释放过程以及器件线路中寄生的弱连接等引起的噪声, 而这些常常是影响高温超导 SQUID 噪声性能的主要因素.

为了获得性能良好的器件,需要生长高质量的高温超导薄膜,薄膜要均匀外延、单一取向、致密且孔洞少。

#### 4 低温超导和高温超导 SQUID

根据所采用的超导材料, SQUID 器件大致可分为低温超导 SQUID 器件和高温超导 SQUID 器件. 本节将从几个方面比较低温和高温超导 SQUID 器件。

**材料** 在具体的超导材料方面,虽然在早期采用不同材料来制备 SQUID 器件,但自上世纪 80 年代以后,低温 SQUID 器件一般都用超导金属铌,采用薄膜平面工艺制备. 铌是难熔金属,机械性能好,用铌薄膜制备的约瑟夫森结非常稳定. 高温超导 SQUID 器件一般采用 YBCO/ReBCO 超导薄膜制备。

**工作温区** 低温超导 SQUID 器件一般工作在 4.2 K,用液氮冷却. 高温超导 SQUID 器件则工作在 77 K,用液氮冷却. 人们也在研究利用基于小型制冷机的恒温器来冷却 SQUID 器件,这样可以方便应用,但面临如何有效抑制制冷机产生的电磁干扰的困难。

**器件制备** SQUID 器件中的关键是约瑟夫森结,低温超导 SQUID 器件中的约瑟夫森结为 Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 三层结构. 其中铝在铌表面浸润性好,可以很好地覆盖在铌膜的表面,绝缘层的厚度可以通过控制铝氧化过程的氧分压和时间来很好地控制. 器件制备中可以通过选用合适的刻蚀气体对铌选择性刻蚀<sup>[21]</sup>. 由于工艺成熟,器件的参数控制比较容易,器件的参数一致性和良率都能够得到较好保证。

与之相比,高温超导约瑟夫森结的制备就要困难得多. 这主要归咎于材料复杂的化学和结构特性、非常短的相干长度、对氧含量敏感等原因,导致薄膜质量难以控制、平整度和均匀性不好,很难在高温超导薄膜上制备非常薄的绝缘层. 因此尚没有利用高温超导薄膜制作三层结构的约瑟夫森结的方法. 早期高温超导约瑟夫森结主要有双晶结、台阶结、台阶 SNS 结(即超导-正常金属-超导结)以及斜边结等形式<sup>[22,23]</sup>,如图 6 所示。

利用不同取向的晶界形成的弱连接称为晶界结. 双晶结是将基片定向后,将两片不同取向的基

片对齐后重新生长在一起,形成双晶基片. 在双晶基片上外延生长高温超导薄膜,由于薄膜取向与基片取向一致,便在晶界处形成双晶结. 双晶结的临界电流密度随双晶取向间的夹角增加而指数减小<sup>[24]</sup>. 通常采用 24°, 45°和 36°的双晶基片制作 SQUID. 用双晶结制备的 SQUID 器件通常有较好的噪声特性,但缺点是需要双晶基片,成本高而且结的位置不能任意选择。

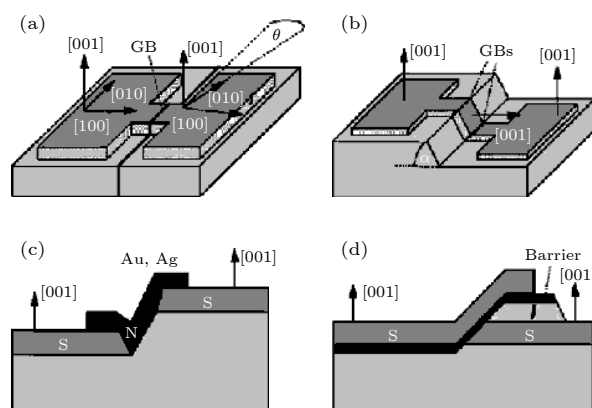


图 6 几种常见的高温超导约瑟夫森结 (a) 双晶结; (b) 台阶结; (c) 台阶 SNS 结; (d) 斜边结<sup>[22]</sup>

Fig. 6. Schematic drawing of four types of HTS Josephson junctions used in SQUIDs: (a)<sup>[21]</sup>.

台阶结是在基片上合适位置刻蚀出一个较缓的台阶,再在基片上外延生长超导薄膜,在台阶处形成弱连接. 由于薄膜在台阶斜坡上的生长取向和基片上不同,台阶处的弱连接实际上也是晶界结. 台阶结的优点是可以在基片的任何位置刻蚀台阶,制备工艺相对简单. 但是台阶结的质量依赖于台阶的微观结构,因此器件性能可重复性不是很好. 不过,近十多年里,随着工艺的不断改进, MgO 基片上台阶结的质量一直在提高,器件制备的一致性有较大提高<sup>[25]</sup>. 德国 Juelich 研究中心的研究人员利用 MgO 基片台阶结获得了白噪声水平达到约 5 fT/Hz<sup>1/2</sup> 的高温超导直流 SQUID 器件,并利用该器件成功检测出人体脑磁信号<sup>[20]</sup>(图 7)。

台阶 SNS 结是利用光刻和 Ar 离子刻蚀的方法在基片上刻出一个很陡的台阶. 然后在基片上生长超导薄膜,由于台阶边缘很陡,在边缘处没有超导薄膜. 再镀上一层 Ag 或 Au 膜覆盖在台阶边缘,形成 SNS 结. 这种结的正常态电压  $I_c R_n$  在 77 K 可以做到 1 mV,然而其输运和噪声性质均不理想。

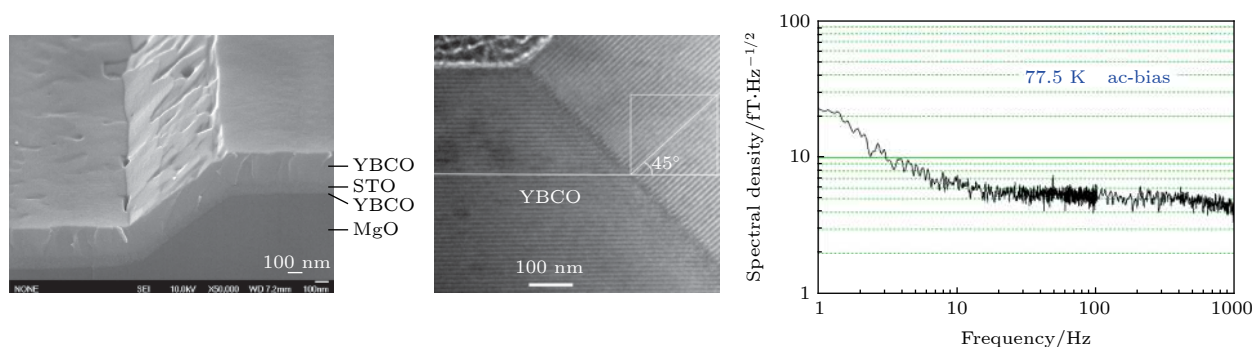


图7 MgO衬底上45°台阶上生长的YBCO薄膜的扫描电镜(SEM)图像(左图)和高分辨透射电镜HRTEM图像(中图). 右图: 一个16 mm大小、采用台阶结的高温超导DC-SQUID磁强计在超导屏蔽环境下测量的噪声谱<sup>[20]</sup>

Fig. 7. SEM image (left) and HRTEM image (middle) of an YBCO film deposited on a double-layer-buffered 45° step on an MgO substrate. A 45° [100]-tilted GB is clearly shown. Right: Noise spectral density of a 16 mm high-Tc DC-SQUID magnetometer with step-edge junctions measured in a superconducting shield<sup>[20]</sup>.

斜边结是先在基片上生长一层超导薄膜和绝缘层,再刻蚀出一个斜边,然后沉积一层阻挡层和顶电极.优点是顶电极的屏蔽作用使得其抗干扰能力强,具有热循环稳定性.日本的研究人员在2000年前后,投入了较大的力量研究斜边结,采用SrSnO<sub>3</sub>/La-YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>/SrSnO<sub>3</sub>/La-YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>多层结构.约瑟夫森结的临界电流偏差分布可以在8%以内<sup>[26]</sup>.

除了上述的四种方法外,人们还采用离子辐照的方式来制备高温超导约瑟夫森结,并制备约瑟夫森结和SQUID器件<sup>[27]</sup>.由于高温超导材料对氧的含量很敏感,利用几十到几百keV的氦、氩、氮甚至氧等轻元素离子可以有效地在高温超导体中形成氧错位和空位等缺陷,使得材料中受辐照区域变成非超导的.最近的研究显示,利用氩离子辐照在狭缝区域局部去除超导材料形成沟槽型弱连接,SQUID器件的噪声水平可以达到63 fT/Hz<sup>1/2</sup>,与双晶结SQUID相当<sup>[28]</sup>.利用有纳米尺度狭缝的金属掩模进行局部辐照的方式,可以根据需要在指定位置制备出约瑟夫森结.此外,近年来随着聚焦离子束技术的发展,利用聚焦氦离子直接局部轰击可以有效形成约瑟夫森结<sup>[29,30]</sup>.

**磁通变换器** 为了获得高的磁场灵敏度,SQUID通常需要通过磁通变换器和一个更大面积的探测线圈耦合.对低温超导SQUID,可以用低温超导导线绕制探测线圈,也可以利用薄膜制成单圈或多圈平面探测线圈.探测线圈可以是一阶或二阶梯度计的形式,便于减少环境干扰.磁通变换器一般做成平面多圈形式,置于SQUID环孔上(图8).

对高温超导SQUID,绕制探测线圈和利用多层薄膜技术制备具有良好超导连接的多圈磁通变换器很困难.目前还没有柔性且易于形成超导连接的高温超导线,因此很难绕制探测线圈.另外,高温超导薄膜材料需要在结晶性好的取向基底上才能很好地外延生长,要制备类似图8所示的多圈磁通变换器比较困难,工艺难度大.国际上只有少数研究组能够制备出,器件良率不易提高.因此,高温SQUID磁强计多采用探测线圈与SQUID回路直接耦合的方式,或者采用倒扣的方式将探测线圈和SQUID耦合.

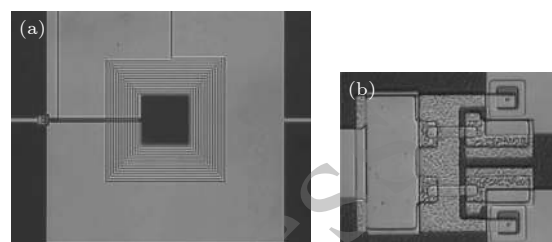


图8 (a) 一个方形线圈DC-SQUID器件的显微镜照片, 上有15圈输入线圈(即磁通变换器); (b) 狭缝左侧末端的放大图. 从图中可以看见结区和并联电阻<sup>[7]</sup>

Fig. 8. (a) Square-washer DC-SQUID with overlaid 15-turn input coil; (b) expanded view of the left-hand end of the slit showing the junction on each side of the slit, and the resistive shunts<sup>[7]</sup>.

**应用** 有关SQUID器件应用更加详细的介绍将在下一节中给出.这里只是简短地对比一下低温超导和高温超导SQUID器件在实际应用场景中的区别.经过50多年的发展,SQUID器件的应用研究已经延伸到许多领域.原则上在绝大部分应用

中,既可以使用低温超导 SQUID 器件,也可以使用高温超导 SQUID 器件.而且,高温超导器件可以用廉价和容易获得的液氮冷却,易于应用推广.因此,高温超导体发现以来,高温超导 SQUID 器件的制备和应用研究一直是一个重要的研究方向,经过 30 多年的努力,器件的性能也一直在不断提升中,报道的最好指标与商用低温超导 SQUID 器件的指标已经比较接近了.但是高性能器件的批量化产出则较多地受到参数的一致性、良率和较高成本的影响.目前,在仅需要单个或少量 SQUID 器件的一些应用中,已经使用高温超导 SQUID 器件.而在需要大批量 SQUID 器件的系统中,如脑磁图测量系统,基本上还是使用低温超导 SQUID 器件.

## 5 SQUID 应用

自上世纪 60 年代 SQUID 出现以来, SQUID 的应用研究一直在不断地持续开展. SQUID 器件具有以下特点: 1) 接近量子极限的磁探测灵敏度,可以探测低至  $10^{-15}$  T/Hz<sup>1/2</sup> 的磁场信号; 2) 具有很宽的频响特性,由于超导体对磁场而非磁场的变化率产生响应, SQUID 器件可以探测直流到 GHz 的信号,通常测试系统的频响受读出电路的限制,一般可达 10—100 MHz 量级; 3) 很大的动态范围, SQUID 器件的动态范围很容易达到 130 dB 水平,磁信号幅度变化 6—7 个量级不会影响系统的工作稳定性; 4) 很高的线性响应特性.由于这些特点,几十年来, SQUID 器件的应用研究已经涉及到医学科学、科学仪器、地球物探、工业无损检测以及精密测量等许多领域.关于已有的 SQUID 应用领域可以参考相关文献 [8,10].

### 5.1 生物磁探测

生物体内血液和神经中离子流动会产生非常微弱的磁信号.利用 SQUID 的高灵敏磁探测能力,可以对人体或其他生物体内不同器官和组织产生的微弱磁信号进行无创无接触检测,在疾病检测和医学研究中极具应用前景.上世纪 70 年代起,就已经开始相关应用研究,首先是心脏图和脑磁图的测量,后来也拓展到身体其他部位,如肺、肠、胃、脊椎和胎儿等的磁信号 [11].由于生物磁探测在医学健康领域的巨大应用前景,相关研究是目前 SQUID

应用研究领域最大的一个分支.

#### 5.1.1 脑磁信号探测

大脑神经活动产生的磁场信号可为研究大脑的行为、脑部疾病产生的原因和确定病灶等提供非常有用的信息,在脑科学和脑疾病研究中越来越受到重视 [31].脑磁图 (magnetoencephalography, MEG) 系统大多采用多路信号探测器,收集大脑外表皮各处的磁信号. MEG 与研究大脑行为常用的脑电图 (EEG) 和脑部功能磁共振成像系统相比,各有优缺点,作用具有互补性.与脑电图相比,脑磁图测量具有无接触无创的优势,而且磁信号和电信号是很好的互补.与磁共振成像相比, MEG 虽然不能提供组织的成像,但具有毫秒量级的时间分辨,可以获得快速的时域响应信息.

人的脑磁信号幅度约在 1—2 pT 的范围, MEG 测量需要 fT 的磁场分辨率.因此, SQUID 器件非常合适于 MEG 应用.目前 SQUID 器件是 MEG 系统中采用最广泛的探测器件,这一领域也是 SQUID 最大的应用领域 [12].1993 年,第一台多通道全头型 MEG 的出现,标志着 MEG 医学临床应用研究的开始.据估计,目前约有 250 台脑磁图商业系统分布在世界各地,主要集中在发达国家.这些系统包含总计约 50000 个 SQUID 器件.

利用 MEG,头部重要功能皮质区 (eloquent cortex) 产生的诱发场、脑震荡源和癫痫活动可以在一次检测中确定,也可以研究大脑两个半球之间的相互作用 [32].二十多年来 MEG 的研究内容也在不断演变和深入,从感知、处理、分析大脑不同区域的功能连通性,到诸如婴儿期到成年期的大脑发育相关问题研究等 [31].目前,癫痫患者的手术前评估,脑肿瘤患者雄辩皮质的鉴定或血管畸形已被公认为临床 MEG 研究的适应症 [33].

由于 MEG 具有很好的时间分辨性和一定的空间分辨率,在研究大脑重要功能皮质层不同区域的功能和彼此之间的连接性方面能够发挥重要作用,因此 MEG 在注意、记忆等认知功能和神经紊乱性疾病等脑科学和脑疾病的研究、诊断以及治疗疗效跟踪和评估等方面可发挥重要作用.图 9 是 SQUID 脑磁测量装置以及研究视觉感知与脑磁信号关系的示意图和一些结果.

全球有数亿人患有癫痫、中风、阿尔兹海默及抑郁症等与大脑相关的疾病,形成巨大的社会负

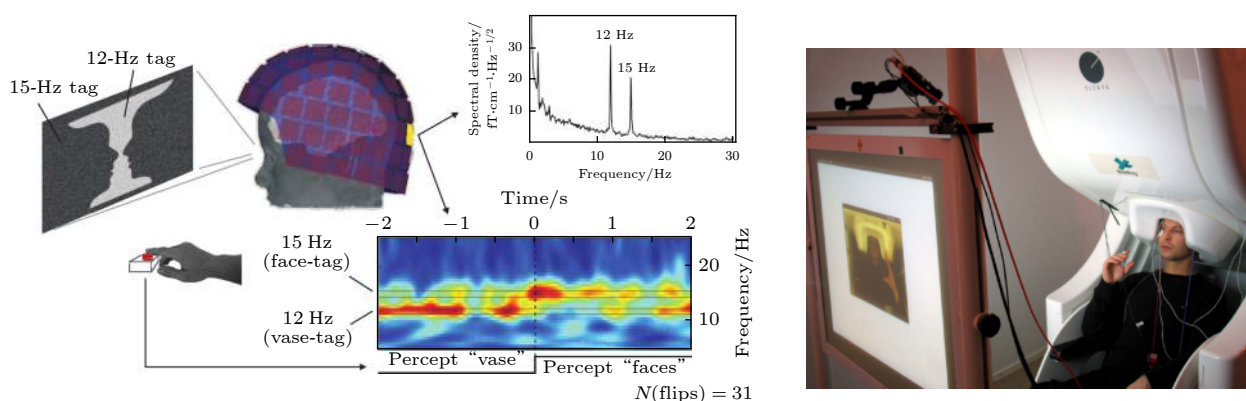


图 9 左图: 利用 MEG 信号进行双稳视觉感知研究. 右图: 一个 SQUID 脑磁测量系统<sup>[1]</sup>

Fig. 9. Left: MEG study of bistable visual perception using a frequency-tagged stimulus; Right: A SQUID MEG system<sup>[1]</sup>.

担. 通过早期的准确检测和诊断方式改进, 可以早发现早治疗, 从而有可能减少这些疾病造成的损害和负担. 因此, 随着 SQUID 脑磁系统的不断改善和技术的进步, SQUID 的潜在需求有可能增加十倍甚至一百倍.

SQUID-MEG 系统的进一步广泛应用至少在以下两方面做大量工作. 首先是大量临床研究数据的积累和分析, 以期建立更多脑磁信号与特定脑功能或脑疾病之间的对应关系, 以便临床应用; 此外还需在提高测量脑磁信号的信噪比、降低制造和使用成本等方面做出不断的改进. 其中制造成本在一定程度上可以随着需求的增加而降低. 目前的 SQUID-MEG 系统采用工作在液氮温度的低温超导 SQUID 器件, 液氮的使用是使用成本高的主要原因. 近年来, 人们已经研发了利用小型制冷机重新液化挥发氮气的闭路恒温器<sup>[34]</sup>, 这样可以减少液氮消耗和补充方面的成本.

使用液氮的另一个缺点是低温恒温器的存在使得 SQUID 探测器和信号源之间的距离 (典型值约为 30 mm) 变大了, 既减少了信号强度又降低了空间分辨率. 近年来, 随着高温超导 SQUID 器件性能的不断提高, 利用高温 SQUID 构建 MEG 系统的研发工作受到更多关注<sup>[20,35]</sup>. 由于工作在液氮温区, 低温恒温器壁厚可大大减小到几毫米甚至 1 mm. 这样, 高温超导 SQUID 器件可以更加接近大脑表皮, 提升空间分辨率, 同时又增加了信号强度.

SQUID 器件在 MEG 中的应用也面临其他技术的竞争. 高灵敏原子磁强计可以具有与 SQUID 器件相当的磁场灵敏度, 基于这种器件的 MEG 系统正在发展中. 其最大的优势是不需要低温系统,

可望显著降低运行成本. 系统重量也可大大减少, 探测头盔可以做成穿戴式. 此外, 器件可以更加靠近大脑表皮, 获得更好的空间分辨率<sup>[36,37]</sup>. 但是原子磁强计工作在标量模式, 无方向分辨. 而且其频率响应范围小, 只能工作在约 30 Hz 以下的频率范围, 动态范围也不大. 由于这些原因, 未来的 MEG 可能是两种探测器并存, 根据应用需求的不同而决定采用原子磁强计还是 SQUID 器件.

### 5.1.2 心磁信号探测

心脏的电生理活动产生的磁场信号可以用 SQUID 器件进行探测. 采用多路探测系统, 可以获得胸部心磁信号的分布, 构成二维心磁图 (magnetocardiography, MCG). 心磁信号的幅度约 100 pT, 测量 MCG 一般需要 0.1—1 pT 的磁场分辨率.

由于心磁信号幅度比脑磁信号大约两个量级, 检测的技术难度相对较低. 人们预计心磁图可作为目前临床普遍使用的心电图的补充, 有望在一些致命性心脏疾病的早期诊断中发挥作用. 全球心脏病患者的数目非常庞大, 据统计, 我国冠心病患者约有 1000 万人, 而且每年有大量的新增病人. 现在临床广泛应用的心电图仍有局限性, 它不能反映所有心脏病变. 尤其是心电图对可能引起心肌梗死的冠心病的漏诊率约有 40%, 因此迫切需要其他的快速方便的检测手段. 在这样的情况下, 心磁图有可能成为一种很好的预先诊断心脏猝死的补充手段.

目前国际上已有一些公司推出了商业化产品. 日本 Tsukuba 大学医院利用一台 64 通道的心磁系统, 在近十年的时间, 对 10000 多位病人进行了心磁图测量, 结果清楚表明心磁图可以给出比心电图更多的信息<sup>[38]</sup>.



国内包括北京阜外医院、天津泰达国际心血管医院以及上海第六人民医院等也先后开展了相关临床研究. 北京大学以及中科院物理所分别研制了基于高温超导 SQUID 器件的心磁测量试验系统, 中科院上海微系统所研制了多通道的低温 SQUID 心磁系统.

目前限制 SQUID 心磁图系统广泛推广使用的主要原因一是建造和使用成本, 二是缺乏建立在大量数据系统分析基础上的具有明确医学意义的心磁图结果与各种心脏疾病的对应关系. 高温超导 SQUID 器件的灵敏度能较好地满足心磁测量, 主要的挑战是提高器件制备工艺的可靠性和良率, 以便用于多通道心磁测量系统.

## 5.2 其他生物医学医用

除上述的脑磁和心磁等生物磁测量应用外, SQUID 弱磁检测在生物医学中还有一些其他应用. 例如, 用 SQUID 追踪检测包附有生物功能基团磁性纳米粒子的 SQUID 免疫测定<sup>[39]</sup>, 和用 SQUID 作为探测器的超低磁场核磁共振和成像等<sup>[11]</sup>. 由于 SQUID 具有高灵敏度, SQUID 免疫测定可检测到极少量的病原. 超低磁场磁共振成像中, 具有不同自旋晶格弛豫时间生物组织的成像对比度更大, 有可能便于区分病变组织. 因此, 这两方面的应用将有可能在诸如癌症和肿瘤组织的早期检测领域发挥作用.

包附有生物功能基团的磁性纳米粒子的追踪检测是生物医学上常用的方法之一. 免疫测定在生物和医学中广泛用于复杂试样如血液中的被分析物含量的确定. 它通过抗原与相应抗体之间的特定结合, 确定试样中是否存在某种特定的抗原及其含量. 随着纳米材料的发展, 利用磁性纳米粒子作为生物标记进行免疫测定的技术得到发展. 利用磁性纳米粒子作为标记并再利用 SQUID 所具有的非常高的磁测量灵敏度, 可以测定出已有方法不能测到的微量抗原. 磁性纳米粒子具有稳定性好、无毒、可以通过磁场进行操控的特点. 实验中通过测量磁性粒子磁矩的变化, 可以定量地确定待测试样中抗原的含量. 这种方法还避免了已有方法中需要洗去未结合抗体的步骤, 使得测定过程更加简单方便. 因此, 这种方法对于生物和医学研究以及更进一步的临床诊断都具有重要的意义.

检测的方式有弛豫时间、交流共振和剩余磁场

检测等几种方式<sup>[39]</sup>. 有研究报道显示, 利用 SQUID 和有特定生物功能基团的磁性标记, 可以从血液中区分检测出早期奥兹海默症对应的  $A\beta_{1-42}$  蛋白<sup>[40]</sup>.

这方面的研究大多采用高温超导 SQUID, 应用的推广需要研制针对各种适应检测的磁性标示物.

磁共振成像 (MRI) 是超导技术最广泛的商业应用, 已经成为临床医学检测和研究不可或缺的工具. 虽然目前磁共振成像技术发展的大趋势是更高磁场, 但在过去二十多年中, 人们也一直探索在超低磁场环境下的核磁共振谱和磁共振成像技术, 以期开发出新的应用. 与常规高场磁共振成像系统相比较, 超低磁场磁共振成像 (ULF-MRI) 可以获得更好的自旋晶格弛豫时间  $T_1$  对比度, 这有可能在肿瘤以及其他检测中发挥作用<sup>[41-43]</sup>. 超低磁场核磁成像系统的磁场一般在  $100 \mu\text{T}$  的量级, 这样的系统简单轻便, 便于移动. 为了补偿由于磁场降低而导致的信号大幅降低, 一般采用施加预极化磁场和采用灵敏的 SQUID 探测器的方式来提升信噪比. 已有的研究显示, 在如此低的磁场下不但可以得到人体组织成像, 而且一系列肿瘤组织的体外测量也表明有可能区分肿瘤和正常组织<sup>[44]</sup>.

对于实际应用而言, 最主要的挑战是如何减少系统中的各种噪声, 提升整体探测灵敏度. 预计, 基于 SQUID 探测器的超低磁场核磁共振和成像系统有可能在肿瘤组织、脑部受损组织、阿尔兹海默症的检测等方面获得应用.

由于 ULF-MRI 和 MEG 都采用 SQUID 器件作为探测器, 可以将两种检测技术集成起来. 这样, 将有可能集合 MEG 测量时间分辨性高和 MRI 空间分辨率好的优点, 有助于脑磁信号的定位和源的重构, 以及获得神经电流的分布图等<sup>[45]</sup>. 图 10 给出了在两个不同 MEG-MRI 集成实验系统上测量的结果. 其中图 10(a) 和图 10(b) 分别给出在一个 MEG-MRI 集成系统上和一个常规的先进的 MEG 上测量得到的脑磁信号结果, 数据是视觉诱发反应产生的等效偶极和磁场分布. 两组结果是在同样的视觉激励方式下得到的. 图 10(c) 和图 10(d) 则分别给出同一个测试样本在另一个 MEG-MRI 集成系统得到的  $96 \mu\text{T}$  磁场下的 ULF-MRI 切片图和一个常规 3T 的 MRI 切片图. 其中 ULF-MRI 系统也测量听觉反应产生的脑磁信号, 相应的偶极子的位置和方向在图 10(c) 中标出.

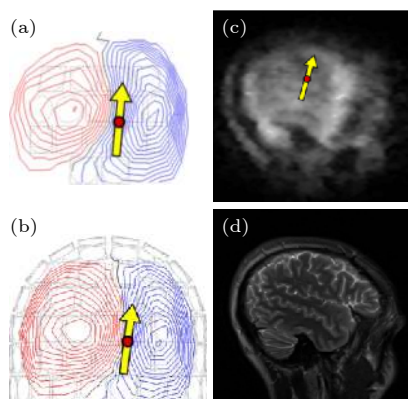


图 10 (a) 在 MEG-MRI 集成实验系统上测量的以及 (b) 同样刺激在最先进的 MEG 系统上得到的视觉诱发反应产生的等效偶极和磁场分布; (c) 用另一个 MEG-MRI 集成实验系统在 96  $\mu\text{T}$  磁场下得到的超低磁场 MRI 切片图和记录的听觉反应脑磁信号对应的偶极子; (d) 常规 3 T 磁场下同一个样本的切片图<sup>[11]</sup>

Fig. 10. Equivalent dipoles and field patterns of the visually evoked responses using (a) the MEG-MRI system and (b) state-of-the-art MEG with the same stimulus protocol. MRI slices (c) at 96  $\mu\text{T}$ , with the registered equivalent dipole of the auditory response overlaid, and (d) from an uncoregistered 3 T image acquired separately from the same subject<sup>[11]</sup>.

### 5.3 地球物理应用

SQUID 器件的高灵敏性和很好的低频特征非常适合于地球物理方面的应用, 用以探测微弱的地球磁场变化或激励的响应信号. 自 SQUID 出现以来, 已经在多种场合开展过示范应用, 一些商业化设备也已经出现<sup>[46-49]</sup>. 这方面的应用大致可分为被动型和主动型两类. 在被动型探测中, SQUID 器件磁强计或梯度计直接探测扫描区域内微弱的地球磁场变化, 发现磁异常区域. 这些磁异常通常与各

种金属矿或其他导电型矿有关. 这类应用中, 通常采用梯度计构型, 或者利用多个梯度计进行磁场分布的全张量测量.

在主动型探测中, 通过测量在地表发射的激励脉冲电磁信号的响应, 可以得到地表下不同深度的信息. SQUID 器件的灵敏性和低频特性有助于获得常规感应式探测线圈所不能得到的深部信息.

当前我国经济快速发展, 对各种矿产资源的需求十分旺盛, 但是我国地下矿产探测主要局限在浅层 (< 800 m), 远低于发达国家的水平 (约 2000 m), 深层资源的探测急需开展. 高灵敏度的 SQUID 磁探测系统对深层地质构造的磁探测能力独特, 远强于传统感应线圈式的探头, 具有较大优势, 将在探寻深层资源方面发挥重要作用. 国内相关单位近年来也加强了相关方面的研究, 在器件制备、系统集成和实地应用研究方面都取得了显著进展.

中国科学院上海微系统研究所成功研制出国际第二套航空低温超导全张量磁梯度探测系统<sup>[50]</sup>, 并进行了多次野外飞行测量, 得到了航空超导全张量磁梯度分布图. 此外, 研制的用于瞬变电磁 (TEM) 探测超导 SQUID 系统, 噪声为 7 fT, 动态范围达 160 dB<sup>[51]</sup>. 在实际应用中, 多地实际反演深度大于 2000 m. 先后成功探到铅锌矿, 并在云南、内蒙等常规技术疑难矿区获得突破, 探测结果得到钻井资料的验证. 图 11 是超导瞬变电磁探矿系统和在内蒙古四子王旗实地测量结果, 数据的反演结果中超过 2000 m 的低阻区域能够清楚地显示出来.

SQUID 器件在地球物理探测中的应用技术还可应用于其他许多场合, 只要有局部的磁或磁响应异常, 包括军事上的潜艇探测、地下溶洞探测、发

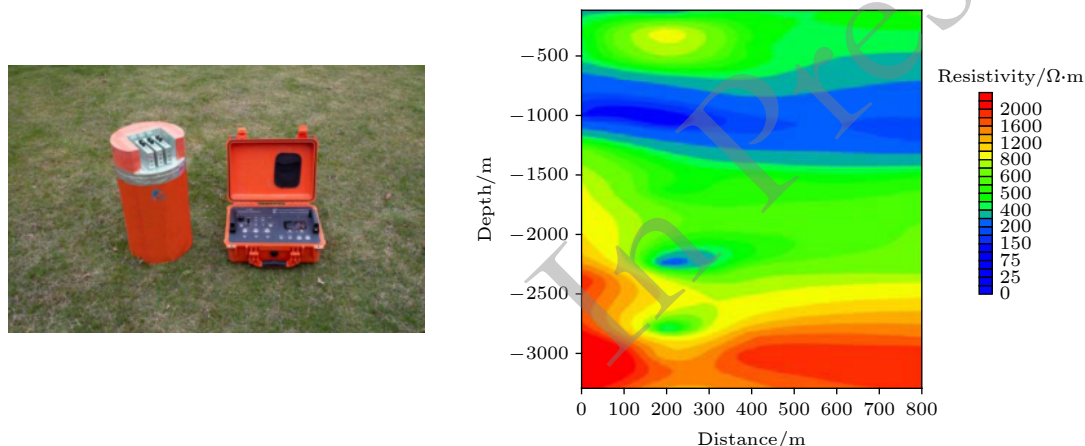


图 11 超导瞬变电磁探矿系统 (左图), 与野外探测结果 (右图)

Fig. 11. SQUID TEM system (left) and field detection results (right).

现考古遗址以及战争遗留的未爆炸武器等<sup>[52]</sup>.

对于野外的现场测试,使用液氮冷却的高温 SQUID 器件更加方便.但是由于高温超导 SQUID 器件的可靠性差,更容易受到环境干扰的影响,比较成熟的系统中还是主要采用低温超导 SQUID 器件.近年来,受液氮供应短缺的影响,低温 SQUID 地球物理探测方面的应用受到较大影响<sup>[53]</sup>.

#### 5.4 科学仪器中的应用

SQUID 器件在各种科学仪器和科学研究领域中都有很多的应用.目前广泛用于材料磁性测量和表征的美国 Quantum Design 公司的磁性质测量系统 (magnetic properties measurement system, MPMS) 产品是一种大家熟悉的使用 SQUID 的科学仪器.该类系统中,一个 SQUID 器件与超导线圈绕成的二阶梯度线圈构成的二阶梯度计用于测量样品的磁信号.

在各种大型天文望远镜中,用于测量深空各种波段电磁辐射信号的探测器大多用到诸如超导转变边沿探测器 (TES)、磁性微型量热器 (MMC)、以及热电子热辐射器 (HEB) 等器件阵列, SQUID 作为灵敏的探测器用于探测这些器件的微小电流变化<sup>[54]</sup>.由于阵列中器件数目庞大,需要大量 SQUID 读出电路,人们发展了多种包括时分、码分和频分方式的多路复用方案<sup>[55]</sup>.此外,基于 SQUID 的低温射频放大器可具有接近量子极限的噪声水平,在诸如暗物质探测等基础科学领域中也扮演着重要的角色,可望将探测效率提升 2—3 个量级<sup>[56,57]</sup>.

扫描 SQUID 显微镜是结合 SQUID 和扫描探测技术发展起来的高灵敏度微区磁信号探测仪器.扫描 SQUID 主要应用于基础科学、纳米材料科学、工业无损检测和分子生物技术等研究领域. IBM 实验室的研究人员利用扫描 SQUID 显微镜证实了高温超导体具有 d 波配对性,大大推动了高

温超导机理的研究<sup>[58]</sup>.半导体芯片中纳米量级芯片导线的无损检测也是扫描 SQUID 显微镜的一个可能应用.目前在市场上已有扫描 SQUID 显微镜的产品.

为了提高扫描 SQUID 的空间分辨率,以色列 Weizmann 科学研究所的一个研究组发展了一种很有创意的称为 SQUID-on-Tip 的方案.他们将石英管拉成直径约 100 nm 的空心细管,在尖端做成针尖 Nano-SQUID,获得了低于 100 nm 的空间分辨率,可测量单个电子自旋.而且,他们利用 SQUID 临界电流随温度的变化,实现了好于 1  $\mu$ K 的局部温度测量.他们用该系统研究了超导薄膜中磁通线的动力学行为 (图 12),以及多种量子物态的局部耗散机制<sup>[59,60]</sup>.

#### 5.5 工业无损检测

无损检测在工业生产环节的质量控制、设备运行的可靠性保障、材料服役性性能的评估等各个领域具有重要的地位.随着人们对质量和可靠性要求的提高,无损检测技术越来越受到重视,新的检测方法和手段也在不断地研究和发展.超导量子干涉器 (SQUID) 无损检测是研究比较多的一种检测技术.虽然基于 SQUID 的无损检测系统价格较贵、操作不方便 (附带低温冷却装置) 会限制其使用范围,但 SQUID 的高带宽、高磁场灵敏度特性,在一些应用中会有很大的优势和发展潜力.高温 SQUID 器件制备技术的发展和成熟将会促进 SQUID 在无损检测中的广泛应用.

SQUID 无损检测实质上是探测被测物体附近的磁场分布从而非接触地获得与磁信号有关的信息 (如缺陷大小、深度等等).根据磁场产生的特点通常可分为无源法和有源法.前者无需激励场,主要用于探测非铁磁材料内的磁掺杂、检测铁磁材料的应力分布、探测铁磁体表面的磁通泄漏 (MFL)

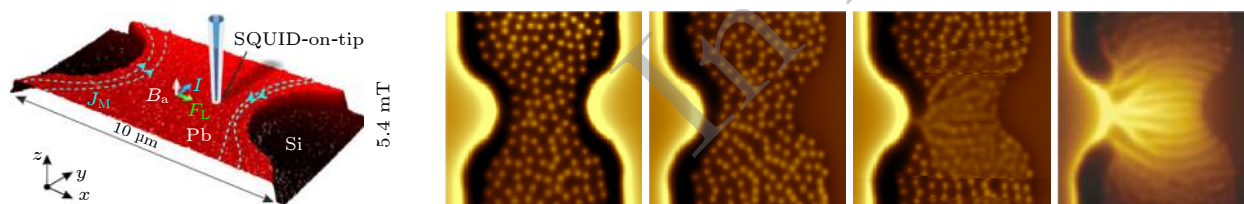


图 12 左图: 针尖 Nano-SQUID 探测 Pb 薄膜的磁通的示意图; 右图: 测量的 Pb 薄膜中静态和运动状态磁通线的图像<sup>[60]</sup>

Fig. 12. Left: Pb thin film sample and the experimental set-up; Right: Magnetic imaging of stationary and fast moving vortices in Pb film at 4.2 K<sup>[60]</sup>.

等. 后者需要对被测材料施加电流或利用电磁激励在导体中产生涡流, 电流 (或涡流) 的分布与导体的导电特性有关, 如果导体中存在缺陷, 该缺陷将会严重影响导体的导电性能, 例如导体块中如果存在裂缝, 电流 (或涡流) 在导体中流动时会绕过裂缝而重新分布, 通过 SQUID 检测该电流 (或涡流) 产生的磁场, 就可得到有关缺陷的信息. 由于 SQUID 具有极高的探测灵敏度, 因此在检测材料的深层缺陷、细小缺陷等方面具有很好的应用前景<sup>[10]</sup>. 已有的应用示范包括: 航空器零部件检测、半导体掺杂均匀性检测、焊接工艺影响检测、碳纤维复合材料检测、金属材料的应力应变检测、磁泄漏 (MFL) 检测、金属材料腐蚀性检测、材料或食品中的磁性或金属粒子检测等许多方面<sup>[61–63]</sup>.

## 6 小结和展望

超导量子干涉器件作为一种最灵敏的磁探测器件, 自从出现以来, 一直受到广泛的关注. 在科学研究、生物医学、资源探测和工业检测等多个领域的应用研究已经取得显著进步, 在一些地方发挥着难以替代的作用. 需要低温环境, 尤其是液氦的使用, 是限制其应用推广的一个重要因素, 采用高温超导材料制备的器件可以在很大程度上减少这种限制的影响. 因此, 不断改进高温超导 SQUID 器件的制备技术, 提升器件性能及一致性是未来 SQUID 应用的一个关键. 同时, SQUID 技术的发展也依赖于新的创新应用的开发. 进入二十一世纪以来, 对于脑科学的研究越来越受到重视, 基于 SQUID 的脑磁图测量有可能发挥更大的作用. 目前量子计算的热潮也促进和拓展了 SQUID 器件的应用, SQUID 可以用于构建超导量子比特, 也可用于超导量子比特的直接读出, 还可以做成高灵敏度的单光子水平微波信号放大器来探测量子比特态的信息<sup>[64–67]</sup>.

## 参考文献

- [1] London F 1950 *Superfluids* (New York: Wiley)
- [2] Deaver B S, Fairbank W M 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 43
- [3] Doll R, Näbauer M 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 51
- [4] Gough C E, Colclough M S, Forgan E M, Jordan R G, Keene M, Muirhead C M, Rae A I M, Thomas N, Abell J S, Sutton S 1987 *Nature* **326** 855
- [5] Josephson B D 1962 *Phys. Lett.* **1** 251
- [6] Anderson P W, Rowell J M 1963 *Phys. Rev. Lett.* **10** 230

- [7] Clarke J, Braginski A I 2004 *The SQUID Handbook* (Vol. 1) (New Jersey: John Wiley & Sons)
- [8] Clarke J, Braginski A I 2004 *The SQUID Handbook* (Vol. 2) (New Jersey: John Wiley & Sons)
- [9] Fagaly R 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 101101
- [10] Anders S, Blamire M G, Buchholz F Im, Crété D G, Cristianoe R, Febvref P, Fritzsche L, Herr A, Ilichev E, Kohlmann J, Kunert J, Meyer H G, Niemeyer J, Ortlepp T, Rogalla H, Schurig T, Siegel M, Stolz R, Tarte E, Brake H J M ter, Toepfer H, Villegier J C, Zagoskin A M, Zorin A B 2010 *Physica C* **470** 2079
- [11] Körber R, Storm J H, Seton H 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 113001
- [12] Clarke J, Lee Y H, Schneiderman J 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 080201
- [13] Pulizzi F 2011 *Nature Materials* **10** 262
- [14] Zhang Y, Dong H, Krause H J, Zhang G F, Xie X M 2020 *SQUID Readout Electronics and Magnetometric Systems for Practical Applications* (New York: Wiley)
- [15] Jaklevic R C, Lambe J, Silver A H, Mercereau J E 1964 *Phys. Rev. Lett.* **12** 159
- [16] Caputo P, Oppenländer J, Hässler Ch, Tomes J, Friesch A, Träble T, Schopohl N 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1389
- [17] Drung D 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** 1320
- [18] Dantsker E, Tanaka S, Clarke J 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2037
- [19] Tesche C D, Clarke J 1977 *J. Low Temp. Phys.* **27** 301
- [20] Faley M I, Pratt K, Reineman R, Schurig D, Gott S, Atwood C G, Sarwinski R E, Paulson D N, Starr T N, Fagaly R L 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 083001
- [21] Gurvitch M, Washington M, Higgins H 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 472
- [22] Koelle D, Kleiner R, Ludwig F, Dantsker E, Clarke J 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** 631
- [23] Tafuri F, Kirtley J R 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 2573
- [24] Dimos D, Chaudhari P, Mannhart J, LeGoues F K 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 219
- [25] Du J, Lazar J Y, Lam S K H, Mitchell E E, Foley C P 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 095005
- [26] Wakana H, Adachi S, Kamitani A, Nakayama K, Ishimaru Y, Tarutani Y, Tanabe K 2005 *IEICE Trans. Electron.* **E88-C** 208
- [27] Bergeal N, Lesueur J, Faini G, Aprili M, Contour J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 112515
- [28] Trabaldo E, Ruffieux S, Andersson E, Arpaia R, Montemurro D, Schneiderman J F, Kalaboukhov A, Winkler D, Lombardi F, Bauch T 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 132601
- [29] Cybart S A, Cho E, Wong T, Wehlin B H, Ma M K, Huynh C, Dynes R 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 598
- [30] Cho E Y, Li H, LeFebvre J C, Zhou Y W, Dynes R, Cybart S A 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 162602
- [31] Hari R, Salmelin R 2012 *NeuroImage* **61** 386
- [32] Hämäläinen M, Hari R, Ilmoniemi R J, Knuutila J, Lounasmaa O V 1993 *Rev. Mod. Phys.* **65** 413
- [33] Mäkelä J P, Forss N, Jääskeläinen J, Kirveskari E, Korvenoja A, Paetau R 2006 *Neurosurgery* **59** 493
- [34] Lee Y H, Kwon H, Yu K K, Kim J M, Lee S K, Kim M Y, Kim K 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 084003
- [35] Öisjöen F, Schneiderman J F, Figueras G A, Chukharkin M L, Kalaboukhov A, Hedström A, Elam M, Winkler D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 132601
- [36] Sander T H, Preusser J, Mhaskar R, Kitching J, Trahms L, Knappe S 2012 *Opt. Express* **3** 981

- [37] Boto E, Holmes N, Leggett J, Roberts G, Shah V, Meyer S S, Muñoz L D, Mullinger K J, Tierney T M, Bestmann S, Barnes G R, Bowtell R, Brookes M J 2018 *Nature* **555** 657
- [38] Inaba T, Nakazawa Y, Yoshida K, Kato Y, Hattori A, Kimura T, Hoshi T, Ishizu T, Seo Y, Sato A, Sekiguchi Y, Nogami A, Watanabe S, Horigome H, Kawakami Y, Aonuma K 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 114003
- [39] Enpuku K, Tsujita Y, Nakamura K, Sasayama T, Yoshida T 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 053002
- [40] Yang S Y, Chieh J J, Yang C C, Liao S H, Chen H H, Horng H E, Yang H C, Hong C Y, Chiu M J, Chen T F, Huang K W, Wu C C 2013 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 1600604
- [41] Clarke J, Hatridge M, Mößle M 2007 *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **9** 389
- [42] Dong H, Hwang S M, Wendland M, You L, Clarke J, Inglis B 2017 *Magn. Reson. Med.* **78** 2342
- [43] Buckenmaier K, Pedersen A, SanGiorgio P, Scheffler K, Clarke J, Inglis B 2019 *Neuroimage*. **186** 185
- [44] Busch S E, Hatridge M, Mößle M, Myers W, Wong T, Mück M, Chew K, Kuchinsky K, Simko J, Clarke J 2012 *Magn. Reson. Med.* **67** 1138
- [45] Magnelind P E, Gomez J J, Matlashov A N, Owens T, Sandin J H, Volegov P L, Espy M A 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 456
- [46] Leslie K E, Binks R A, Lam S K H, Sullivan P A, Tilbrook D L, Thorn R G, Foley C P 2008 *Leading Edge* **27** 70
- [47] Hato T, Tsukamoto A, Adachi S, Oshikubo Y, Watanabe H, Ishikawa H, Sugisaki M, Arai E, Tanabe K 2013 *Supercond. Sci. Technol.* **26** 115003
- [48] Chwala A, Stolz R, Schmelz M, Zakosarenko V, Meyer M, Meyer H G 2015 *IEICE Trans. Electron.* **E98.C** 167
- [49] Supracon A G <http://www.supracon.de/>
- [50] Song Z, Dai H, Rong L, et al. 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1600205
- [51] Rong L, Bao S, Wu J, et al. 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1601704
- [52] Stolz R, Zakosarenko V, Schulz M, Chwala A, Fritzsche L, Meyer H G, Kötlin E O 2006 *Leading Edge* **25** 178
- [53] Halperin W P 2014 *Nat. Phys.* **10** 467
- [54] Yang C, Si M T, You L X 2020 *Sci. China Inf. Sci.* **63** 180502
- [55] Irwin K D, Cho H M, Doriese W B, Fowler J W, Hilton G C, Niemack M D, Reintsema C D, Schmidt D R, Ullom J N, Vale L R 2012 *J. Low Temp. Phys.* **167** 588
- [56] Sloan J V, Hotz M, Boutan C, et al. 2016 *Phys. Dark Universe* **14** 95
- [57] Asztalos S J, Carosi G, Hagmann C, et al. 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 041301
- [58] Tsuei C C, Kirtley J R 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 969
- [59] Embon L, Anahory Y, Jelić Ž L, Lachman E O, Myasoedov Y, Huber M E, Mikitik G P, Silhanek A V, Milošević M V, Gurevich A, Zeldov E 2017 *Nat. Commun.* **8** 85
- [60] Halbertal D, Cuppens J, M. Ben Shalom Shalom M. B, Embon L, Shadmi N, Anahory Y, Naren H R, Sarkar J, Uri A, Ronen Y, Myasoedov Y, Levitov L S, Joselevich E, Geim A K, Zeldov E 2016 *Nature* **539** 407
- [61] Hatsukade Y, Inaba T, Marumo Y, Tanaka S 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 723
- [62] Krause H J, Michael M M, Tanaka S 2015 *SQUIDS in Nondestructive Evaluation. In Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications* (Vol. 2) (Weinheim: Wiley)
- [63] Faley M, Kostyurina E, Kalashnikov K, Maslennikov Y, Koshelets V, Dunin-Borkowski R 2017 *Sensors* **17** 2798
- [64] Clarke J, Wilhelm F K 2008 *Nature* **453** 1031
- [65] Krantz J P, Kjaergaard M, Yan F, Orlando T P, Gustavsson S, Oliver W D 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 021318
- [66] Kwon S, Tomonaga A, Gopika L B, Devitt S J, Tsai J S 2020 arXiv:2009.08021 [quant-ph]
- [67] Kjaergaard M, Schwartz M E, Braumüller J, Krantz P, Wang J I J, Gustavsson S, Oliver W D 2020 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11** 369

SPECIAL TOPIC—Superconductivity and its applications

## Superconducting quantum interference devices\*

Zheng Dong-Ning<sup>1)2)3)†</sup>

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

( Received 15 December 2020; revised manuscript received 29 December 2020 )

### Abstract

Superconductivity is a macroscopic quantum phenomenon. Flux quantization and the Josephson effect are two physical phenomena which can best reflect the macroscopic quantum properties. Superconducting quantum interference device (SQUID) is one type of superconducting devices which uses these two characteristics. SQUID devices are widely used in the sensitive detection of magnetic signals. This paper briefly introduces the background and recent developments of low temperature superconductor and high temperature superconductor SQUID devices.

**Keywords:** superconducting devices, Josephson effect, superconducting quantum interference device

**PACS:** 85.25.-j, 74.50.+r, 85.25.Dq

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202131

In Press

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2016YFA0300600, 2017YFA0304300) and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XDB28000000).

† Corresponding author. E-mail: [dzheng@iphy.ac.cn](mailto:dzheng@iphy.ac.cn)