

• 王 其 俊 •

超导量子干涉器

SQUID

• 西 北 大 学 出 版 社 •

DC-SQUID

RF-SQUID

30.3



数据加载失败，请稍后重试！

内 容 简 介

本书比较全面和系统地论述了射频超导量子干涉器(RF-SQUID)、直流超导量子干涉器(DC-SQUID)及SQUID磁测仪器的工作原理、设计方法、典型结构和电路、制作工艺以及发展动向。全书共六章:超导电性基础、约瑟夫逊效应、射频超导量子干涉器、直流超导量子干涉器、超导量子干涉器的应用、超导结和超导量子干涉器的制备。每章章末附有参考文献。

本书的读者是:SQUID仪器的研制人员,低温物理、地球物理、生物磁学、计量科学方面的技术人员,有关大专院校的师生。

超 导 量 子 干 涉 器

王 其 俊

西北大学出版社出版发行

(西安市太白路)

新华书店经销 西安电子科技大学印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张10.25字数260千

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-5604-0021-3/O·3 定价:2.80元

序

超导量子干涉器(SQUID)是一种磁通传感器,配上输入和测读电路,即可构成磁感应强度、磁场梯度、磁化率、电流、电压、电阻、小位移等测量仪器。它们的灵敏度、动态范围、频率响应、响应时间比同类常规仪器高几个数量级,在低温物理、生物物理、地球物理、计量等学科上有着重要应用,在地质勘探、医疗、航天、通讯、军事等部门亦有巨大的应用潜力,所以发展很快。七十年代中期,第一代 SQUID 问世,八十年代初第二代 SQUID 投放市场。近来,超导材料研究工作的一系列重大突破,为工作在液氮乃至干冰温区的 SQUID 制造奠定了物质基础,将导致这些温区的 SQUID 的诞生,并大大扩展 SQUID 仪器的应用范围。可以深信, SQUID 仪器的发展前景非常明朗。

本书主要讨论 SQUID 的原理、设计、工艺和应用,它是作者根据近十年内发表的中、英文资料,并援引了中国科学院物理研究所、中国计量科学研究院、北京大学、复旦大学、长春地质学院、西北大学等单位在研制 SQUID 方面的经验,而写就的。其中第 5.5, 5.6, 6.1—6.3 节的部分或全部内容取自《超导隧道效应及其应用》一书(西北大学低温物理科研组主编,中国制冷学会 1981 年内部印刷),它们分别由杨沛然(§ 5.5, § 5.6, § 5.8),陈其恒、徐风枝、孟小凡(§ 6.1—§ 6.3)同志撰写。

在本书编写过程中,西北大学科研处给予了巨大的支持和帮助。南京大学姚希贤和中国计量学院曾佩韦二教授审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,作者借此机会向他们表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中难免有缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

王其俊

1987年7月

目 录

绪 论	(1)
第一章 超导电性基础	
§ 1.1 超导体的基本性质	(9)
一、零电阻性	(9)
二、完全抗磁性	(10)
三、外磁场和传输电流可以破坏超导性	(11)
§ 1.2 金兹堡——兰道方程 全磁通量子化	(11)
§ 1.3 电子——声子相互作用	(13)
§ 1.4 单电子隧道效应	(15)
第二章 约瑟夫逊效应	
§ 2.1 弱耦合	(17)
§ 2.2 超导结的基本方程式	(18)
§ 2.3 超导结的伏安特性	(20)
一、伏安特性的测量	(20)
二、恒流源偏置的超导结的动态特性	(20)
三、 $\cos \theta$ 项对超导结的动态特性的影响	(30)
第三章 射频超导量子干涉器	
§ 3.1 实用结构	(33)
§ 3.2 RF-SQUID 环在外磁场中的性质	(34)
一、参量 K 对 RF-SQUID 量子态跃迁的影响	(37)
二、参量 G 对 RF-SQUID 量子态跃迁的影响	(39)
三、参量 G 和 K 对 RF-SQUID 量子态跃迁时间的影响	(41)
四、 $\cos \theta$ 项对 RF-SQUID 量子态跃迁的影响	(43)
五、RF-SQUID 环孔中的外磁通是时间的线性函数或正弦函数时, 它的动态特性	(43)
§ 3.3 $I_{rf}-V_{rf}$ 特性和 $V_{rf}-\Phi_0$ 特性	(49)
一、测量结果和理论分析	(49)
二、射频偏置电流的选取	(56)
三、 $V_{rf}-\Phi_0$ 特性	(57)
§ 3.4 锁定式线路	(58)
一、音频磁通调制	(59)
二、磁通锁定式线路	(61)
§ 3.5 磁通噪声和能量分辨率	(62)
一、磁通噪声	(62)
二、能量分辨率	(64)

§ 3.6 摆率	(66)
一、锁定式线路的通频带和磁通噪声的关系	(66)
二、失锁几率和平均失锁时间	(68)
三、摆率	(69)
§ 3.7 环电感计算	(70)
一、轮形空腔 RF-SQUID 环电感	(72)
二、单孔和双孔 RF-SQUID 环电感	(72)
三、平面薄膜 RF-SQUID 环电感	(73)
§ 3.8 磁通变换器	(74)
一、零磁通法	(74)
二、零电流法	(76)
§ 3.9 RF-SQUID 性能参数的测量	(77)
§ 3.10 实用电路简介	(78)
一、300 型探头	(78)
二、控制单元	(79)
§ 3.11 超高频、微波及其他射频 SQUID	(82)
一、超高频 SQUID 和微波 SQUID	(82)
二、两个射频信号偏置的 SQUID	(83)
三、电阻滤波的 RF-SQUID	(84)
四、非回滞模式的 RF-SQUID	(84)
五、热噪声电流偏置的 RF-SQUID	(85)
第四章 直流超导量子干涉器	
§ 4.1 引言	(87)
§ 4.2 DC-SQUID 环的特性	(89)
一、DC-SQUID 方程式	(89)
二、不计噪声时, DC-SQUID 的特性	(91)
三、考虑噪声时, DC-SQUID 的特性	(92)
四、电压噪声频谱密度	(95)
五、环流噪声频谱密度及相关噪声频谱密度	(96)
六、磁通噪声	(97)
七、固有能量分辨率	(99)
八、能量分辨率	(100)
九、 $\frac{1}{f}$ 噪声	(102)
§ 4.3 测量电路	(103)
一、谐振电容两端的电压	(104)
二、频率响应和摆率	(106)
三、前级放大器的噪声	(108)
四、磁通噪声	(108)

五、漂移	(109)
第五章 SQUID 仪器	
§ 5.1 磁强计	(111)
一、一般输入电路的 DC-SQUID 信噪比	(111)
二、DC-SQUID 磁强计的最小可检测能量	(113)
三、实用电路	(116)
§ 5.2 电压表	(118)
一、谐振式输入电路 DC-SQUID 电压表	(118)
二、非谐振式输入电路 DC-SQUID 电压表	(120)
三、实用电路	(121)
§ 5.3 电流计	(123)
§ 5.4 磁场梯度计	(124)
一、线绕输入电路的磁场梯度计	(124)
二、平面薄膜 DC-SQUID 磁场梯度计	(125)
三、同时测量磁场梯度的三个分量	(127)
§ 5.5 磁化率计	(130)
一、工作原理	(130)
二、噪声	(132)
三、应用	(132)
§ 5.6 核磁共振谱仪	(134)
一、工作原理	(134)
二、特性	(135)
§ 5.7 电压比较仪和电流比较仪	(137)
一、电压基准监测系统	(137)
二、电阻式电压比较仪	(138)
三、电流比较仪	(138)
§ 5.8 电阻电桥	(140)
§ 5.9 其他 SQUID 仪器	(141)
一、用于超流液氦研究的温度梯度计	(141)
二、测量弱磁场的绝对强度	(141)
三、射频衰减测量	(142)
第六章 超导结和 SQUID 的制备	
§ 6.1 点接触结和点接触结 SQUID 的制备	(144)
§ 6.2 微桥结的制备	(146)
一、硬超导材料薄膜的制备工艺	(146)
二、微桥结的制备工艺	(147)
§ 6.3 隧道结的制备	(151)
一、铅合金隧道结的制备	(151)
二、铌隧道结的制备	(152)

三、A-15 材料隧道结的制备 (153)

四、 T_c 大于 77K 的超导薄膜的制备 (154)

绪 论

1961年, B·D·Josephson 从理论上预言了超导电子对隧道效应^[1], 翌年, 这个预言被实验证实^[2]。紧接着, R·C·Jakevic 等人于 1964 年发现^[3]两个隧道结经超导体连成闭合环路, 当通上适当大小的直流电流后, 会显现一种宏观量子干涉现象, 即隧道结两端的电压是该闭合环路环孔中的外磁通量的周期性函数, 其周期为 $\phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$, h 和 e 分别为普朗克常数和电子电量, ϕ_0 为磁通量子。于是, 人们把这个环路叫做超导量子干涉器(Superconducting Quantum Interference Device, 缩写为 SQUID)。它是用直流电流偏置的, 故也叫做直流超导量子干涉器(DC-SQUID)。之后, 人们又研制成功由超导微桥结、点接触结和焊滴结组成的 DC-SQUID^[4~6]。这种器件就其功能讲, 是一种磁通传感器, 可以用来测量磁通及转变成磁通的其他物理量, 如电流、电压、电阻、电感、磁感应强度、磁场梯度即磁感应强度对空间坐标的一阶和二阶导数、磁化率、温度、位移等, 但因当时的器件工艺水平有限, 这种器件未能完善成为实用的测量仪器。

1967 年, 人们又发明了射频超导量子干涉器(RF-SQUID)^[7]。这种器件的核心部分是一个点接触结和超导体连成的闭合回路, 它是用射频磁通偏置的。由于只含有一个超导结, 工艺上比较简单, 与室温电路的耦合问题易于解决, 磁通灵敏度也比当时的 DC-SQUID 的灵敏度高, 因此获得迅速发展, 在七十年代初就投入实际应用。1972 年, 美国已有商品出售, 磁通灵敏度为 $10^{-4}\phi_0 \text{ Hz}^{-1/2}$, 比常规磁测仪器好得多。

RF-SQUID 的一个变种, 即 R-SQUID 当时也获得应用^[8], 它的核心部分是一个超导结、小电阻和超导体连成的闭合回路, 小电阻上通有直流电, 其他部分与 RF-SQUID 相同。R-SQUID 可用来测量温度和热容。

1974 年以前, DC-SQUID 的发展速度比 RF-SQUID 缓慢, 但 1974 年后, 人们对 DC-SQUID 的兴趣又浓厚起来。这主要是因为超导薄膜工艺有了发展。1975 年, J·Clarke 等人研制成功与室温电路耦合良好的薄膜隧道结 DC-SQUID^[9], 它的磁通灵敏度比当时的 RF-SQUID 高一个数量级, 到 $10^{-5}\phi_0 \text{ Hz}^{-1/2}$ 。1980 年, 最好的 DC-SQUID 的磁通灵敏度已达到 $10^{-7}\phi_0 \text{ Hz}^{-1/2}$, 目前, 人们正力图把灵敏度提高到量子力学极限水平, 能量分辨率的量子力学极限约为 $h/2\pi$ 。

薄膜超导结制备工艺的日趋完善, 也促使 RF-SQUID 的研究工作向纵深发展, 1981 年, 由隧道结和钨块组成的混合式 RF-SQUID 投放市场^[10]。其性能如下: 磁通灵敏度 $2 \times 10^{-4}\phi_0 \text{ Hz}^{-1/2}$; 最大量程 $\pm 500\phi_0$; 频率响应 $0 \sim 20 \text{ KHz}$, 可延伸到 200 KHz ; 摆率 $3 \times 10^5\phi_0 \text{ S}^{-1}$; 漂移 $\pm 2 \times 10^{-4}\phi_0/h_r$ 。

近年来, 利用微波代替射频的微波 SQUID 获得发展。含有大量 SQUID 器件的集成电路也在发展, 它将导致新一代 SQUID 仪器的诞生。

总之, DC-SQUID、RF-SQUID、R-SQUID 及微波 SQUID 的理论、设计思想、制造工艺还在不断完善中, 它们的性能还能大幅度提高, 其应用范围还能扩大。

一台性能优良的 SQUID 仪器必须具有以下主要技术性能: 能量分辨率高、冷热循环性

能好、精确度高、摆率大、线性好、频响宽、响应快、量程大、温漂小、抗电磁干扰能力强、抗震能力强、性能稳定、工作可靠、寿命长、能耗低、容易制作、容易安装、操作简便、便于携带、价格低廉等。显而易见，上述的一些指标是相互矛盾的，一台仪器不可能各方面都是完善的。实验工作者可根据具体任务去设计、选用和购置合适的 SQUID 仪器。

SQUID 仪器的发展现状和动向如下：

一、发展 SQUID 理论

SQUID 仪器是精密仪器，它们的制作，必须在理论指导下进行，否则收效甚微。如今人们已经创立了较完善的设计理论，根据这些理论，可以设计超导结、SQUID 环、输入电路、耦合电路及室温电路。但目前还没有包括输入电路在内的最佳设计计算公式，没有计算散粒噪声和计算极限灵敏度的严格公式。最佳设计参数往往是利用实验方法确定的。

为此，近年来，人们正从理论上和实验上研究 SQUID 的极限灵敏度问题。这项研究工作很重要，它的解决将深化人们对于超导结和 SQUID 固有噪声的机理和规律性的认识，促进超导结工艺和高性能 SQUID 仪器的制造，有助于开拓 SQUID 新的应用领域。

已有的研究结果表明，隧道结的固有噪声比点接触、微桥结的固有噪声要小，DC-SQUID 的磁通噪声比 RF-SQUID 的磁通噪声小，因此，发展隧道结 DC-SQUID 有着更明朗的前景。

SQUID 的特性参量 β_c 和 β' 的最佳值是^[12]：

$$\beta_c = \frac{2\pi I_c R^2 C}{\phi_0} \approx 1 \quad (0.1)$$

$$\beta' = \frac{2LI_c}{\phi_0} \approx 1 \quad (0.2)$$

式中 I_c 、 R 、 C 分别为超导结的临界电流、结电阻、结电容， L 为 SQUID 环电感。 $I_c R$ 和所用超导材料的能隙 2Δ 成正比，

$$I_c R \approx \frac{\pi \Delta}{2e} \quad (0.3)$$

在 $\beta_c \approx 1$ 、 $\beta' \approx 1$ 的最佳条件下，DC-SQUID 的固有能量分辨率为 $8KT(\pi LC)^{1/2}$ ，其中 K 为波尔兹曼常数、 T 为 DC-SQUID 的温度，因此，减小 T 、 L 、 C ，使用能隙 2Δ 大即 $I_c R$ 大的材料， I_c 和 R 取折衷的最佳值，可以改善能量分辨率。

美国标准局和 IBM 公司研制的 DC-SQUID 的能量分辨率已接近 $h = 6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ^[11]，比近似理论计算出的极限能量分辨率大半个数量级。加州大学和劳洛次实验室联合研制的 DC-SQUID 的结电感为 2pH、结电容为 0.3pF，1.4K 时的能量分辨率为 $3.4 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

二、发展超导结和 SQUID 环的制作工艺

为了制作高性能的 SQUID 仪器，其中的超导结临界电流 I_c 、结电阻 R 和结电容 C 、SQUID 环电感 L ，除了必须满足上述关系外，还要求超导结的电流和量子位相差间的关系最好是正弦式的或接近正弦式的，超导结及 SQUID 的参数不能因冷热循环和长期室温存放而变化，也不能随液氮温度的变化而明显变化，为此，所用超导材料最好是 Nb、Nb₃Sn、NbN、Nb₃Ge 等。目前最常用的超导材料是 Nb、Pb 合金。

全铌点接触结、微桥结、隧道结 SQUID 的性能可以大致比较如下：点接触结 SQUID 的优点是：容易制造，利用精密机械加工设备便可制造出来。也易做出临界电流、结电阻、结电容、电流——相位关系均满足要求的 SQUID 探头。它的缺点是冷热循环及抗震性能较差，采用专门措施(如用环氧树脂密封点接触结并用锁紧螺母定位等)，可使这两个缺点得到一定程度的改善，从而具有足够的可靠性及相当长的寿命。因此，七〇年代以前商品化 SQUID 都是点接触结的，绝大多数的实验也是用这种 SQUID 完成的。今后几年内，在要求不很高的低频实验和微波段应用中，它仍占有重要地位。但上述缺点却是固有缺陷，不可能根治，加之它的微型化亦不可能，因此，迟早要被隧道结和微桥结 SQUID 所代替。

隧道结 SQUID 和微桥结 SQUID 的突出优点是：铌隧道结和铌微桥结的冷热循环及抗震性能较好，它们的参数不因冷热循环和长期室温存放而变化，是寿命较长的器件。缺点是极难制造。对于隧道结，需要用精密的超高真空溅射、蒸镀设备来制作仅有几十 Å 厚的氧化势垒层及势垒层两侧的铌膜。为消除隧道结直流伏安特性曲线上的回滞，还需要用电阻分流或制作线度为亚微米的小面积隧道结，并需严格控制膜的成分和厚度，要用电子束刻蚀工艺制作适当的样品图形。如今人们已经制造出长和宽均为 $0.3\mu\text{m}$ 的隧道结^[13]。对于微桥结，需用精密真空溅射、蒸镀设备来制作长和宽为微米量级、厚度为 100Å 量级的桥区。为消除微桥结伏安特性曲线上的回滞，则需把桥区尺寸减小到亚微米量级，或者采用变厚微桥，而制作亚微米尺寸的微桥结也需采用上述设备和工艺。目前人们已经制出长 $0.25\mu\text{m}$ 、宽 50nm 、厚 30nm 的微桥^[14]。

近年来，人们正在研究半导体势垒隧道结及三维结构的微桥结^[15~17]。前者的优点是势垒层较厚(几千 Å)、结电容小、性能稳定。后者的优点是寄生电感、自热效应、准粒子电流的影响都小。这两种新型超导结将会改善 SQUID 仪器的性能。

1986 年以前制造的 SQUID 都是在液氮温度 (4.2K) 下工作的，这使得 SQUID 的广泛应用受到很大限制，为摆脱液氮，人们正在研究高临界温度超导材料的 SQUID。1987 年 4 月下旬美、日两国分别研制出工作温度 68K 和 77K 的钇钡铜氧化物薄膜 SQUID。1987 年 5 月下旬人们研制出临界温度 225K 和 260K 的新超导材料，还发现室温下显现超导迹象的材料。6 月可能发现了 35°C 的超导体^[18]。这些发展动向表明，工作在干冰温区乃至室温的 SQUID 将问世。

三、发展混合式 SQUID 探头

当 SQUID 环电感和超导结的临界电流满足式(0.2)时，相应 SQUID 的磁通分辨率高。因为合用超导结的临界电流为微安量级，故要求环电感为 10^{-10}H 量级，这是一个很小的电感。为保证小电感，对于点接触结 SQUID，就要减小环孔直径。但孔径太小时，输入线圈、反馈线圈、谐振线圈的绕制很困难，这些线圈和 SQUID 环间的耦合也变得很坏，有损 SQUID 性能。综合考虑后，发现单孔和双孔 SQUID 的孔径以 2mm 左右、长度大于 8mm 为宜。为进一步改善 SQUID 性能，发明了环电感更小，由十几个孔并联而成的分数匝 SQUID，但它的结构复杂；还发明了环形空腔 SQUID，这种 SQUID 不仅环电感小，而且具有屏蔽外磁场的 ability。现在人们公认，双孔 RF-SQUID 和环形空腔 RF-SQUID 是两种较好的结构形式。对于隧道结和微桥结 SQUID，隧道结或微桥结与平面超导薄膜组成的 SQUID 的环

电感要做到 10^{-10}H 量级, 平面 SQUID 环孔直径必须小于 1mm , 而这样环孔与线绕输入线圈、反馈线圈、谐振线圈间的耦合不能达到最佳程度。隧道结或微桥结与柱面超导薄膜组成的 SQUID 的环电感可以做到 10^{-10}H 量级, 但制作工艺较复杂, 另外, 输入线圈、反馈线圈、谐振线圈的安装、定位问题, 对外界电磁干扰的屏蔽问题也较困难, 因此, 不易商品化。与此相反, 双孔和环形空腔点接触结 SQUID 却没有这些缺点。

可见, 隧道结或微桥结 SQUID 与点接触结 SQUID 的优缺点基本上相反, 于是, 人们试图制造一种兼有三种 SQUID 优点, 同时又没有它们的缺点, 因而性能更好的混合式 SQUID。美国 SHE 公司 1981 年制成的混合式 RF-SQUID 相当于将点接触结环形空腔 SQUID 中的点接触结用隧道结代替而形成的^[10]。国外, 还研制了平面双孔 RF-SQUID 和双孔铌柱组成的混合式 RF-SQUID^[10], 国内学者也研制成功一种混合式 DC-SQUID^[20]。

四、发展集成式 SQUID

SQUID 环和输入线圈间的耦合系数愈大, 则该系统的能量分辨率愈高。若输入线圈是线绕的, 则与 SQUID 环间的耦合系数 k 不会高, k^2 最多可达 0.3 左右。为了解决这个问题, 有人^[21]将平面螺旋状的输入线圈、平面 DC-SQUID 及平面调制线圈做在同一个基片上, 环电感为 90pH 。输入线圈共 50 匝, 电感为 190nH 。这时, k^2 为 0.86, 4.2K 时的能量分辨率为 $19h$, 1.5K 时的能量分辨率为 $8h$ 。

还有人研制成全铌膜集成式磁场梯度计, 整体尺寸仅有 $12 \times 17\text{mm}^2$ 。

发展集成式 SQUID 是 SQUID 技术的重要发展方向, 这方面的工作才开始, 潜力很大。将来可能会把前级放大器也做在含有 SQUID 环、输入回路及调制回路的基片上。甚或可能作出由微型 SQUID 阵列组成的模——数转换器。模——数转换器的用途很多, 其中一个应用是取代如今的 RF-SQUID 和 DC-SQUID 磁测仪器中的放大器及锁相电路, 从而大大简化电路, 也消除了相应的噪声。这种数字式磁测仪器的噪声可达到量子力学极限。它的其他优点是: 摆率更高, 线性更好, 电路中的有源器件更少。现在已做出含有 16 个超导结的模——数转换器^[22]。它是新一代的 SQUID 仪器。

发展集成式 SQUID 的最终目标是创制各种数字式电路和模拟电路。

五、发展性能优良的电路

一台性能优良的 SQUID 仪器, 不仅超导结和探头部分要好, 同时还要有优良的电路。

对于 RF-SQUID, 射频偏置频率高时, 灵敏度加大、摆率增高、频率响应加宽。为此, 人们研制成功超高频 ($\approx 460\text{MHz}$) SQUID^[23] 及微波 (10GHz) SQUID^[24]。这种微波 SQUID 需要室温的微波源及波导系统, 比 RF-SQUID 系统复杂。为此, 有人建议发展微波 (3GHz) SQUID。

为提高 RF-SQUID 的性能, 还要求谐振线路的谐振阻抗大、谐振线圈和前级放大器的噪声小, 为此, 有人发明了工作在液氮温度的低噪声、低漂移前级放大器^[25]。

对于 DC-SQUID, SQUID 环和前级放大器间往往用变压器耦合, 这不能达到最佳阻抗匹配。为此, 人们发展了谐振式耦合电路^[26]。

为提高 SQUID 磁强计的灵敏度及降低 SQUID 电压表的噪声, 人们发展了谐振式输入

电路^[27]。

关于电路的室温部分，电路程式必须先进，要有温度补偿电路、抗干扰电路、信号平滑电路、线性化电路、置零电路、监测电路及量程、灵敏度、摆率转换电路。另外，所用器件性能必须优良，接地及屏蔽措施必须得当。

六、发展轻型杜瓦容器和微型制冷机

SQUID 探头本身是小巧的，但如今的探头都在液氮温度下工作。为此，必须把探头装入液氮杜瓦容器，并需经常补充液氮的消耗，这就使得整个系统庞大、笨重，严重阻碍着 SQUID 仪器在野外、空中及水下的应用。解决这个问题的根本办法是：发展工作温度高于 4.2K 的 SQUID。而就低温的获得和保持而言，则要发展尺寸小、重量轻、蒸发率小、坚固耐用，能满足一些特殊要求(如无磁性、特定形状)的杜瓦系统。如今已经制造出容量 5-25 升、日蒸发率为 1.0 升的玻璃杜瓦容器；还制出容量 180 升、日蒸发率为 1.8 升的杜瓦容器。太空实验室用的蒸发率极小的杜瓦系统正在研究中。

还要发展 SQUID 仪器专用的震动小、噪声低、无磁性、能耗小、操作简便的微型液氮机。这种微型液氮机和轻型杜瓦系统最好是一个整体。由于氦气资源有限，该系统应当是闭合循环系统且泄漏率低。微型斯特令循环制冷机现可获得的最低温度已达 7K^[28]，可望达到 4.2 K。

美国斯坦福大学正在研制一种新原理的制冷机：在电路基片上刻蚀出微型毛细管，氮气通过毛细管膨胀，由于焦耳——汤姆逊效应产生冷量，可使基片冷却到 80K。再继续利用氢气和氮气的焦耳——汤姆逊效应，则可能把基片冷却到 4.2K。这种制冷机对于 SQUID 仪器的广泛应用将有重要意义。

七、发展 SQUID 仪器的应用

SQUID 是一种磁通传感器，用适当的输入电路与之耦合，便可以测量转变成磁通的其他物理量，如磁感应强度、磁感应强度对空间坐标的一阶导数和二阶导数、磁化率、电压、电流、电阻、电感、线位移、射频衰减、射频功率等。SQUID 测量这些量的优点如下：

1. 灵敏度极高。如测量磁感应强度、磁感应强度对空间坐标的一阶导数、电压、电流、电阻、电感、磁化率、线位移的灵敏度已分别达到 $10^{-16} \text{THz}^{-1/2}$ 、 $10^{-15} \text{Tm}^{-1} \text{Hz}^{-1/2}$ 、 $10^{-16} \text{VHz}^{-1/2}$ 、 $10^{-13} \text{AHz}^{-1/2}$ 、 $10^{-8} \Omega$ 、 10^{-11}H 、 10^{-15}emu/cm^3 、 $10^{-2} \text{\AA}$ 。随着 SQUID 仪器的进一步完善，测量这些量的灵敏度还能提高 1 到几个数量级。

2. 量程大。可测量的最大磁场接近于所用超导材料的临界磁场。对于铌材，可达百分之几。但这时存在漂移和回滞现象。可测量的最小磁场为 10^{-16}T 。亦即，它可以测量从 10^{-16} 到 10^{-2}T 的磁场。

3. 线性好。SQUID 仪器本质上是线性的，已作到 10^{-6} 。它的非线性主要来源于结构材料中的顺磁性杂质，另外，薄膜 SQUID 也显现非线性效应。使用更纯的结构材料或改用块状超导体，非线性可小于 10^{-7} 。

4. 频率响应宽。上限频率约为调制频率的一半。对于微波 SQUID，调制频率为射频，因此，它的响应频率可以作到从 0 到几百 MHz。

5. 摆率大。摆率决定于噪声及调制频率,噪声愈小和调制频率愈高,则摆率愈大。摆率已作到 $10^6 \phi_0 S^{-1}$, 可望再提高一、两个数量级。

以上各性能指标都比常规弱磁测量仪器好1个或几个数量级,因此,利用它可以解决常规仪器不能解决的很多精密测量问题。迄今,它主要用在低温物理学、计量标准工作、地球物理学、生物磁学等方面

具有回滞的 SQUID 还是一种开关元件,可以构成各种逻辑电路。它的优点是:(1) 速度高,开关速度为 10pS,比半导体器件快10 倍以上;(2) 能耗低,每个器件的能耗为 μW 量级,比半导体器件小 10^3 倍;(3) 集成度高,可与半导体集成电路相比拟,例如,处理机和贮存器的体积为 $10cm^3$;(4) 信号在超导微带线中传输时的畸变很小;(5) 尺寸稳定,用于谐振器时,具有很高的频率稳定性;(6) 许多靠得很近的超导微带线中的信号相互干扰很小;(7) 热噪声低。对于低电平和宽频带信号,仍有很高的信噪比;(8) 超导薄膜可提供理想的磁屏蔽;(9) 传输线终端可以加电阻性匹配负载,使得信号不反射;(10) 在 4.2K,扩散、腐蚀、电迁移等物理现象和化学反应几乎都停止了,使器件的可靠性加大。可见,发展以 SQUID 为基本单元的各种电路具有美好的前景。

SQUID 技术应用的发展动向如下:

1. 提高已有实验室用 SQUID 仪器的性能并研制新型 SQUID 仪器,如自标定噪声温度计^[29]、三分量梯度计^[30]、测量磁场强度绝对值的仪器^[31]、平面微波 SQUID^[32]、电容分流的双环孔 DC-SQUID^[33]、噪声偏置的 RF-SQUID^[34]、二个射频电流偏置的 RF-SQUID^[35]、SQUID 高频电流放大器^[36]、热容测量仪^[37]、工作在超流氦温度的电流比较仪、平面的电压基准、射频衰减及噪声温度计等,以供低温物理、计量标准、地球物理、生物磁学、材料科学研究用。

2. 研制医疗诊断用的 SQUID 仪器^[38]。目前 SQUID 仪器对人体磁性(如心磁、肺磁、脑磁等)的研究仍处于基础研究阶段。与电测量法相比,它有许多优点,如可无接触测量、可测量直流效应、可测量体内组织诱发出的磁场等。很可能用于心血管系统疾患、矽肺诊断、胎儿心率测量,也可能有助于揭示大脑的活动规律。为此,需提高磁场梯度计的灵敏度,采用信号平均技术及带通滤波技术。

3. 发展地质勘察用的 SQUID^[39]。从灵敏度、频率响应等性能来看,SQUID 仪器在寻找石油、地热、各种金属矿藏方面有着明朗的前景。为实现这个目的,需发展野外、空中、水下用的三分量梯度计及三分量梯度计和重力仪的组合系统。这些系统不仅灵敏度要高,还要有良好的抗震、抗电磁干扰能力,其尺寸和重量要小。

4. 发展用于天体研究的 SQUID 仪器^[40],如测量太阳及其他天体的磁场,测量太阳风及电离层中的粒子流的磁场反常。将 SQUID 仪器作为辐射热测量仪的低噪声、低阻抗放大器。

5. 发展与重力仪、陀螺仪、加速度计及惯性导航系统配套的 SQUID 仪器^[41]。

6. 发展 SQUID 低频通信系统^[42]。

7. 发展用于潜艇侦察的 SQUID 系统^[43]。

8. 发展用于引力波、基本粒子及磁单极子探测的 SQUID 系统。对于这种应用,要求尽量提高 SQUID 的灵敏度。

9. 发展包括大量 SQUID 器件的高速数字式电路,如取样自保电路,逻辑、触发、贮

存电路,计数器,模—数转换器,移位寄存器,滤波器,多道谱仪^[43]以及超导电子计算机。为此,需要发展大规模集成电路工艺及微型组装工艺。

10. 发展包含大量 SQUID 器件的模拟电路,如参量放大器、混频器、稳频器、微波发生器、超外差毫米波接收机^[43]。

由上述可以得到以下结论^[44]:

SQUID 是一种具有优良性能的磁通传感器和开关元件。SQUID 加上适当的输入电路便可构成许多测量仪器。将许多微型 SQUID 及其他元件组合在一起,便可以构成许多数字式集成电路、模拟式集成电路。如今,仅 SQUID 低频磁测仪器商品化了,其他 SQUID 仪器和电路还处于实验室研究阶段。商品化低频磁测仪器的灵敏度、摆率、线性、量程、频率响应等比常规仪器好得多,已用来解决常规仪器不能解决的许多精密测量问题,其性能还可大幅度提高。而处于实验室研究阶段的 SQUID 磁测仪器的灵敏度已经很高了,但其他性能还有待改善。

含有大量 SQUID 的集成式数字电路和模拟电路研究工作正在展开。

当代,一个新的技术革命正在兴起,计量技术和微电子技术是新技术革命的组成部分。SQUID 技术又是计量技术和微电子技术的一个分支,它正强有力地与其他学科渗透,同时又极力吸收其他学科的新成就壮大自己,从而具有旺盛的生命力。SQUID 技术正蕴酿着新的重大突破。

参 考 文 献

- [1] B.D. Josephson, *Phys. Lett.*, 1, 251(1962)
- [2] P.W. Anderson et al., *Phys. Rev. Lett.*, 10, 236(1963)
- [3] R.C. Jakevic et al., *Phys. Rev. Lett.*, 12, 159(1964)
- [4] J. Lambe et al., *Phys. Lett.*, 11, 16(1964)
- [5] J.E. Zimmerman et al., *Phys. Rev.*, 141, 367(1966)
- [6] J. Clarke, *Phil. Mag.*, 13, 115(1966)
- [7] A. H. Silver et al., *Phys. Rev.*, 157, 317(1967)
- [8] R.A. Kamper et al., *J. Appl. Phys.*, 42, 132(1971)
- [9] J. Clarke et al., *IEEE Trans.*, Mag-11, 724(1975)
- [10] The SHE hybrid SQUID, *Phys. Today*, May, 24(1980)
- [11] M.W. Cromer et al., *Appl. Phys. Lett.*, 37, 723(1981)
- [12] 西北大学低温物理科研组,《超导隧道效应及其应用》,中国制冷学会,1981
- [13] H.D. Hahlbohm et al.,《SQUID' 80, superconducting quantum interference devices and their applications》Proceeding of the second international conference on superconducting quantum interference devices, Berlin(west), May 6-9, 1980
- [14] D.A. Rudman et al., *IEEE Trans.*, Mag-15, 582(1979)
- [15] H. Kroger et al., *IEEE Trans.*, Mag-15, 488(1979)
- [16] M.D. Feuer et al., *Appl. Phys. Lett.*, 36, 226(1980)
- [17] J.H. Claassen et al., *Appl. Phys. Lett.*, 36, 771(1980)
- [18] 1987年5月26日《人民日报》,1987年6月3日《人民日报》
- [19] C.T. Wu et al., *J. Appl. Phys.*, 49, 316(1978)
- S.S. Pei et al., *Appl. Phys. Lett.*, 25, 480(1975)

- C.T.Wu et al., *Appl. Phys. Lett.*, 30, 609(1977)
- Makoto Ibuka et al., *IEEE Trans.*, Mag-30, 251(1984)
- [20] 徐凤枝等, 第二届全国超导隧道效应学术会议资料, 1982
- [21] M.B.Ketchen et al., *Appl. Phys. Lett.*, 40, 736(1982)
- [22] R.E.Harris et al., *Appl. Phys. Lett.*, 35, 720(1979)
- [23] H.Ahola et al., *J.Low Temp. Phys.*, 35, 315(1979)
- [24] J.N.Hollenhorst et al., *IEEE Trans.*, Mag-15, 474(1979)
- [25] A.P.Long et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 51, 85(1980)
- R.J.Prance et al., *Cryogenics*, 21, 501(1981)
- [26] J. Clarke et al., *J. Low Temp. Phys.*, 25, 99(1976)
- [27] M.B.Simmonds et al., *IEEE Trans.*, Mag-15, 478(1979)
- [28] 同[13] pp.423-443
- [29] R.J.Soulen et al., *J. Low Temp. Phys.*, 40, 553(1980)
- [30] K.Shirac et al., *Cryogenics*, 21, 707(1981)
- [31] K.Kosuge et al., *Cryogenics*, 20, 223(1980)
- [32] 同[13] pp. 955-960
- [33] C.D.Tesche, *J.Low Temp. Phys.*, 47, 385(1982)
- [34] 薛寿清等, 第二届全国超导隧道效应学术会议资料, 1982
- [35] Tsutomu Yamashita et al., *J. Appl. Phys.*, 50, 4503(1979)
- [36] J.E. Zimmerman et al., *Appl. Phys. Lett.*, 31, 360(1977)
- [37] J.G. Park et al., *J. Low Temp. Phys.*, 40, 257(1980)
- [38] 邱经武, 低温与超导, 第3期, 39(1983)
- [39] 同[13] pp.603-613
- [40] J.E. Zimmerman, *Cryogenics*, 20, 3(1980)
- [41] R.L.Peterson, *Cryogenics*, 20, 299(1980)
- [42] M. Nisenoff, AIP Conf. Proc. 44, *«future trends in superconductive electronic»*, Charlottesville, 1980, p.117
- [43] A.H.Silver, *IEEE Trans.*, Mag-15, 268(1979)
- [44] 王其俊, 低温与超导, 第4期, 28(1984)

第一章 超导电性基础

§1.1 超导体的基本性质^[1~6]

一、零电阻性

通常,在深低温区,金属的电阻率随温度的降低而减小,最后趋近于一稳定值,该稳定值叫做该金属的剩余电阻率。如纯铜在 4.2 K 时电阻率为 $10^{-10}(\Omega\text{m})$ 数量级,剩余电阻率为 $10^{-11}(\Omega\text{m})$ 数量级。这就是说,导电性很好的纯铜也有电阻。

1911 年昂尼斯等人发现,汞不遵从上面的规律:当降低汞的温度时,它的电阻在 4.2 K 附近突然下降,在很窄的温度间隔(约 0.05 K)内下降为零,在这个温度以下,电阻仍然为零。继而人们还发现许多材料都具有这种性质。这种性质称为超导电性。具有超导电性的材料叫超导材料。电阻突然变为零的温度称为临界温度。每一种材料都有一个特定的临界温度,通常用 T_c 表示。电阻转变为零以前的状态叫做常导态,电阻转变为零以后的状态叫做超导态。表 1.1 示出临界温度较高的超导元素、合金及化合物。超导陶瓷是新近发现的,计有铌钡铜氧化物、钡钡铜氧化物、钡钇铜氧化物、钡镧铜氧化物等。人们还发现起始转变温度 225 K、260 K、26°C、35°C 的新超导材料^[7,8]。预计还会发现更多的高温超导体。这些新超导材料的性质正在研究中。原先发现的各种超导材料,按其性质可分成三类:第一类超导体、第二类超导体及不均匀第二类超导体。表 1.1 中,汞、铟等为第一类超导体。充分退火的铌为第二类超导体。未退火的铌、合金、化合物为不均匀第二类超导体。

表 1.1 一些超导元素、合金及化合物的临界温度

材 料	超导陶瓷	Nb ₃ Ge	Nb ₃ Ga	Nb ₃ Al	Nb ₃ Sn	V ₃ Si	V ₃ Ga	PdH ₂
$T_c(\text{K})$	90-95	23.2	22.5	19.0	18.1	17.6	16.5	16.0

材 料	PbMo ₆ S ₃	Nb	Pb	La	Tc	V	Ta	Hg	In
$T_c(\text{K})$	15.2	9.3	7.2	6.0	8.2	5.3	4.5	4.15	3.4

由超导体的零电阻性质,可以推导出两个重要结论:

1. 闭合超导回路中的电流永不衰减

为了深刻理解这个性质,可以进行下面的对比实验。匀强磁场中有一铜环,铜环中没有电流,磁力线均匀地穿过铜环。进而,在时刻 $t = 0$,迅速地撤掉磁场,铜环中将感应一个电流 $I(0)$ 。这个电流随时间 t 的变化规律是:

$$I(t) = I(0)\exp(-Rt/L)$$

式中 R 和 L 分别为铜环的电阻和电感。此式表明,铜环中的电流以 L/R 为时间常数按指数规律衰减,最后衰减为零。这是因为铜环有电阻,电能变成热能损耗掉了。

如果将铜环改成超导圆环又怎样呢?首先在匀强磁场中放一温度较高、处于常导态的圆环。象铜环那样,圆环中没有电流,磁力线均匀地穿过圆环;接着我们降低温度,使圆环转