

大有效面积的高 T_c rf SQUID^{*}

刘新元^{1,2)} 谢飞翔¹⁾ 孟树超¹⁾ 马 平¹⁾ 杨 涛¹⁾ 聂瑞娟¹⁾ 王守证¹⁾ 王福仁¹⁾ 戴远东¹⁾

¹⁾ 人工微结构和介观物理国家重点实验室 北京大学物理学院, 北京 100871

²⁾ 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

(2003 年 2 月 12 日收到 2003 年 2 月 24 日收到修改稿)

设计和制作了一种新型结构的高 T_c rf SQUID 探头。在使用高温超导薄膜共面谐振器作为射频谐振回路的情况下, 采用了大面积高温超导薄膜作磁通聚焦器, 这种结构既有利于得到低的磁通白噪声, 又可加上大面积聚焦器以增大有效面积, 因而容易得到高的磁场灵敏度。实验中在 15 mm × 15 mm 的衬底上得到了有效面积为 1.27 mm², 在磁通噪声为 $2.1 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ 时, 磁场灵敏度为 34 fT/√Hz。该结构易于推广应用到更高频率的高 T_c rf SQUID。

关键词: 高 T_c rf SQUID, 新型结构, 大有效面积, 磁通聚焦器

PACC: 7400, 7430C, 7450, 7490

1. 引言

近年来高温超导 SQUID 及其应用的研究取得很大进展^[1-6]。SQUID 的灵敏度决定于 SQUID 系统的噪声。SQUID 的噪声越小, 其灵敏度越高。SQUID 的磁场噪声谱密度($\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$)为

$$S_B^{1/2} = \frac{\partial B}{\partial \Phi} \times S_\phi^{1/2} = \frac{S_\phi^{1/2}}{A_{\text{eff}}},$$

式中 $S_\phi^{1/2}$ 是磁通噪声谱密度($\phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$), $\frac{\partial B}{\partial \Phi}$ 是 SQUID 探头的磁场磁通转换系数, 它是有效面积 A_{eff} 的倒数。为了使 SQUID 有高的磁场灵敏度, 除了需要尽量减小系统的磁通噪声 $S_\phi^{1/2}$ 外, 增大有效面积 A_{eff} 是有重要作用的。

rf SQUID 系统的磁通噪声与射频谐振回路有密切关系。理论分析和实验研究表明, 谐振回路的谐振频率越高, 谐振回路的品质因素 Q 越高, rf SQUID 磁通噪声越小。利用高温超导薄膜容易制成高谐振频率和高 Q 值的谐振器。在高 T_c rf SQUID 的研究中 Zhang 和 Mueck^[7] 曾发展了 S 型的高温超导 YBCO 薄膜半波长微带谐振器, 其工作频率达到 3GHz。将 rf SQUID 器件集成在 S 型谐振器中间。由于谐振器结构的限制, SQUID 器件的有效面积很小, 因而此

种结构未能得到高的磁场灵敏度。为了使高 T_c rf SQUID 能得到大的有效面积, 高的磁场灵敏度, 人们曾尝试用大面积的高温超导块材或薄膜作为磁通聚焦器紧贴 SQUID 器件以提高系统有效面积。Zhang^[8] 曾用直径 22 mm, 厚 3.5 mm 的 YBCO 块材作为磁通聚焦器, 使外径 6 mm × 6 mm rf SQUID 器件的有效面积提高了 2.4 倍。但因使用电感电容谐振器, 工作频率为 100MHz, 磁通噪声较大($2.13 \times 10^{-4} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$), 因而也未能得到好的磁场分辨率。以后, Zhang^[9] 开发了一种 YBCO 超导薄膜共面谐振器, 如图 1(b) 所示, 它是一种变形的共面微带线半波长谐振器, 它和 SQUID 器件及控制电路间的耦合结构如图 1(a) 所示。超导薄膜谐振器由三条不闭合的环线构成, 中间的环线为半波长微带线, 内外环线相当于地线。为了使系统有较大的有效面积, 将内环线作得很宽, 内孔约为 1.5 mm。它兼作磁通聚焦器。外径 $\varnothing = 3.5$ mm 的 rf SQUID 器件面对面地与共面谐振器相贴。工作在 800MHz 频段的高温超导薄膜共面谐振器制作在 10 mm × 10 mm 的 LaAlO₃ 衬底上, 中心线尺寸约为 8 mm, 配上内孔为 10 μm × 500 μm, 外径 $\varnothing = 3.5$ mm 的 rf SQUID 器件, 其磁场磁通转换系数 $\partial B / \partial \Phi = 2.56 \text{nT}/\phi_0$, 即有效面积约为 $A_{\text{eff}} = 0.81 \text{mm}^2$ 。高温超导共面谐振器的 Q 值很容易做到几千, 配以好的 SQUID 器件, 系统的磁通噪声容易做到 2

* 国家重点基础研究计划项目(973 计划)(批准号: G19990646-09)和国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(批准号: 863-2002AA306412)资助的课题。

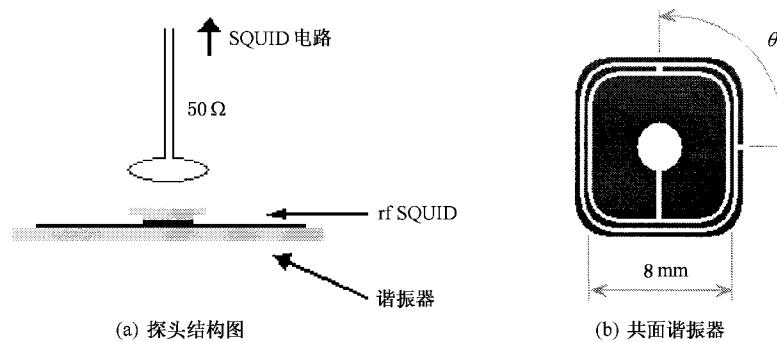


图1 现有的高 T_c rf SQUID器件和超导薄膜谐振器及其耦合方式 ((a)中粗实线表示超导薄膜)

$\times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$, 最好可以做到 $1 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$.

这种结构的高 T_c rf SQUID 磁场灵敏度一般可到 $50\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$,最好做到 $23\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}^{[9]}$.然而在这种结构中,器件的有效面积受到超导薄膜共面谐振器尺寸的限制,不能进一步提高.特别是如果为了降低磁通噪声 $S_\phi^{1/2}$ 而进一步提高工作频率,例如提高到 $1.3-1.5\text{GHz}$,此时共面谐振器的尺寸需按比例减小,结果会使 SQUID 的有效面积减小,因而会降低磁场灵敏度.本文的目的是发展一种新型结构的高 T_c 薄膜 rf SQUID 系统,在这种结构中,磁通聚焦器和超导薄膜共面谐振器是分离开的.磁聚焦器用更大面积的高温超导薄膜制成,可得到更大的有效面积,因而可提高磁场灵敏度,而且便于推广到更高频率范围时并不损失器件的有效面积.

2 新型结构方案设计

为了使 rf SQUID 系统有较低的磁通噪声, 射频谐振回路需要高的谐振频率和 Q 值。为此使用高温超导薄膜谐振器是必须的。但上面叙述的 Zhang^[9] 的

共面谐振器方案中,兼作磁通聚焦器的谐振器内环尺寸受到谐振器尺寸的限制,有效面积不能进一步提高。为了得到大的有效面积,需要将磁聚焦器与共面谐振器分离。为此我们采用了孟树超^[10]研制的高温超导薄膜共面谐振器,如图2(b)所示。它与Zhang的共面谐振器基本结构相似,惟一差别是内环改为细线,不再兼作磁通聚焦器。SQUID器件则采用大面积的垫片式器件,安放在超导共面谐振器的下方(与耦合环相对的另一侧)。文献[10]的结果表明,此种结构的rf SQUID不仅能稳定地工作,而且与Zhang的结构相比确实增大了有效面积。孟树超所设计的结构很容易应用到具有大面积磁聚焦器的结构中。图2(a)是我们现在设计的高T_c rf SQUID。磁聚焦器由面积较大的YBCO超导薄膜制成,外经Φ=3.5mm的SQUID器件与磁聚焦器面对面相贴。超导薄膜共面谐振器放在SQUID器件上方,在SQUID和微波耦合环中间。谐振器与SQUID器件之间的距离可以通过加入一定垫片来调节,以改变SQUID和谐振器回路之间的耦合系数κ。

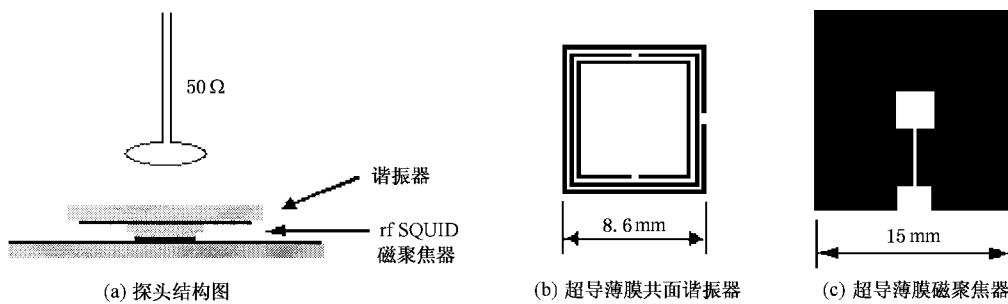


图2 新型结构的超导共面谐振器、磁聚焦器及与SQUID器件的耦合方式示意图 ((a)中粗实线表示超导薄膜)

3. 实验结果

我们研制了上述结构的高 T_c rf SQUID 系统。如图 2(b) 和(c) 的超导薄膜共面谐振器和磁聚焦器作在 LaAlO_3 的衬底上。薄膜用脉冲激光淀积制备, 厚度约为 300 nm。图形采用标准光刻工艺制备, 即甩胶、烘烤、曝光、显影、定影, 最后用 2% 的稀磷酸湿法腐蚀而成。

超导共面谐振器的谐振频率设计为 800MHz 频段, 外环尺寸为 8.6 mm, 它制作在 10 mm × 10 mm 的 LaAlO_3 衬底上。三条开口环的宽度均为 200 μm , 开口大小是 50 μm , 线间距离为 100 μm , 外环与中环开口处成 90° 角。该共面谐振器的谐振频率和无载品质因数 Q_0 用反射法在 HP8590L 谱仪上测量, 测得谐振频率 f_0 在 740MHz 左右。无载品质因数 Q_0 一般为 3000 到 4000。

实验用的超导薄膜磁聚焦器作在 15 mm × 15 mm 的 LaAlO_3 衬底上, 为了充分利用衬底面积, 超导薄膜一直延伸到衬底边缘。磁聚焦器中心孔尺寸为 1.2 mm × 1.2 mm, 在开缝的外端口设计了一个方形缺口(见图 2(c)), 在整个图形光刻曝光以前, 此处预先经较长时间曝光, 以避免制作过程中狭缝在端点连接。

整个探头按图 2(a) 所示装配, 所用高 T_c rf SQUID 器件外径 $\varnothing = 3.5$ mm, 内孔为 10 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, 制作在 5 mm × 5 mm 的 SrTiO_3 衬底上, 器件上的 Josephson 结为衬底台阶结。微波耦合环到谐振器之间的距离可以调节, 用以调节带有 rf SQUID 器件的谐振器与微波传输线之间的耦合系数, 改变探头的有载品质因素 Q_L , 一般 Q_L 调到 200 到 400 比较合适。

用 800MHz 的 rf SQUID 射频工作电路测量了该结构探头的性能, 并用 HP 35665A 动态信号分析仪测量了系统的噪声谱曲线。测量是在 μ 合金屏蔽筒内进行的。测量结果示于图 3。可以看出其白噪声(800Hz 以上)很低, 为 $S_\phi^{1/2} = 2.1 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ 。我们对该结构系统的磁场磁通转换系数进行了定标, 在谐振器与 rf SQUID 器件之间未加垫片的情况下, 测量得 $\partial B / \partial \phi = 1.63 \text{nT}/\phi_0$, 有效面积 $A_{\text{eff}} = 1.27 \text{ mm}^2$ 。由此可得系统的磁场灵敏度 $S_B^{1/2} = 34 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (白噪声区)。

孟树超^[10]的研究指出, 在使用如图 2(b) 所示的中空共面谐振器时, 由于谐振器上超导薄膜对磁场的抗磁作用, 谐振器与 SQUID 器件之间的距离对系统有效面积有一定的影响。若在二者之间垫一定厚度的基片, 增大二者之间的距离, 则谐振器薄膜的抗磁作用减小, 有效面积相应增大。为了比较, 在如图 2(a) 的结构中, 我们在超导谐振器与 SQUID 器件之间垫了三片 100 μm 厚的玻璃片后进行同样测量, 测得 $\partial B / \partial \phi = 1.49 \text{nT}/\phi_0$, 确实有效面积稍有增大, 但磁通白噪声也相应提高到 $2.8 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ 。

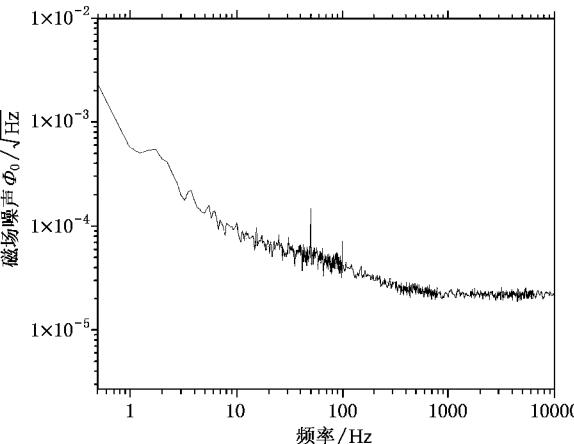


图 3 磁通噪声谱曲线

4. 讨 论

我们所设计的上述结构, 在采用外径 $\varnothing = 3.5$ mm, 内孔为 $10 \times 500 \mu\text{m}^2$ rf SQUID 器件时, 其有效面积 $A_{\text{eff}} = (\partial B / \partial \phi)^{-1} = 1.27 \text{ mm}^2$, 在磁通噪声为 $2.1 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ 时, 磁场灵敏度为 $34 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。同样的器件在 Zhang 的共面谐振器结构中 A_{eff} 只有 0.81 mm^2 , 在磁通噪声相同的情况下, 磁场灵敏度只能达到 $54 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。此结果表明, 我们设计和研制的 rf SQUID 不仅保留了 Zhang 采用高 T_c 超导薄膜共面谐振器的优点, 具有小的磁通噪声 $S_\phi^{1/2}$, 而且有效面积有较大提高, 这里我们只用了 15 mm × 15 mm 的高温超导薄膜作磁通聚焦器, 采用更大面积的衬底制作 YBCO 高温超导薄膜和磁聚焦器并不困难, 这样, 器件的有效面积和磁场灵敏度容易得到进一步提高。此外, 从图 2(a) 容易看出, 该种结构容易推广到 1.3GHz 工作频率, 此时如图 2(b) 空心超导共面谐振器尺寸相应减小, 但 rf SQUID 器件与磁聚焦器

的组合结构与谐振器尺寸无关,因而有效面积基本不会改变。

图3的结果表明,我们现在得到的SQUID系统的低频噪声还较大,白噪声到低频噪声的拐点在

800Hz左右,其可能的原因是作为磁聚焦器的大面积超导薄膜冻结了一定磁通。这些磁通的热激活蠕动会产生器件的低频噪声,解决的方法是在超导薄膜上打孔或将实心膜做成细条结构^[11]。

- [1] Faley M I , Poppe U , Urban K , Paulson D N , Starr T N and Fagaly R L 2001 *IEEE Trans . Appl . Supercond.* **11** 1383
- [2] Zhang Y 2001 *IEEE Trans . Appl . Supercond.* **11** 1038
- [3] Ma P , Yao K et al 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 224 (in Chinese) 马平、姚坤等 2002 物理学报 **51** 224]
- [4] Ding H S , Han B et al 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 220 (in Chinese) [丁红胜、韩冰等 2002 物理学报 **51** 220]
- [5] Ding H S , Zhang F H , Yan X M , Chen G H , Yu H W , Dong S Y , Han S J and He Y S 2002 *Chin . Phys .* **11** 1135
- [6] Han B , Chen G H et al 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 2051 (in Chinese) [韩冰、陈庚华等 2000 物理学报 **49** 2051]
- [7] Zhang Y , Mueck M , Braginski A I and Topfer H 1994 *Supercond . Sci . Technol .* **7** 269
- [8] Tavrin Y , Zhang Y , Mueck M , Braginski A I and Heiden C 1993 *Phys . Lett .* **62** 1824
- [9] Zhang Y , Zander W , Schulert J , Ruders F , Soltner H , Banzet M , Walters N , Zhang X H and Braginski A I 1997 *Appl . Phys . Lett .* **71** 704
Zhang Y , Walters N , Zhang X H , Sochulert J , Zander W , Soltner H , Yi H R , Banzet M , Ruders F and Braginski A I 1998 *Appl . Supercond .* **6** 385
- [10] Meng S C , Deng P et al 2002 *Chin . J . Low Temp . Phys .* **24** 179 (in Chinese) 孟树超、邓鹏等 2002 低温物理学报 **24** 179]
- [11] Dantsker E , Tanaka S and Clarke J 1997 *Appl . Phys . Lett .* **70** 2037

Large effective area high T_c rf SQUID *

Liu Xin-Yuan^{1,2)} Xie Fei-Xiang¹⁾ Meng Shu-Chao¹⁾ Ma Ping¹⁾ Yang Tao¹⁾ Nie Rui-Juan¹⁾
Wang Shou-Zheng¹⁾ Wang Fu-Ren¹⁾ Dai Yuan-Dong¹⁾

¹⁾ National Laboratory for Mesoscopic Physics and Department of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China)

²⁾ School of Electronics Engineering and Computer Science , Peking University , Beijing 100871 , China)

(Received 12 February 2003 ; revised manuscript received 24 February 2003)

Abstract

We have designed and fabricated a new type of high T_c rf SQUID sensor. A high T_c coplanar superconducting resonator and a large area high T_c superconducting film concentrator have been used simultaneously. With a large effective area and low white flux noise, we have achieved a flux noise of $2.1 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ and a magnetic field sensitivity of $34 \text{fT} / \sqrt{\text{Hz}}$ in white noise range, respectively, using an effective area of 1.27 mm^2 concentrator on a $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ substrate. This design can be easily applied to higher frequency high T_c rf SQUID system.

Keywords : high T_c rf SQUID , a new structure , large effective area , flux concentrator

PACC : 7400 , 7430C , 7450 , 7490

* Project supported by the State Key Program of Basic Research of China (Grant No. G19990646-09) and the National High Technology Program of China (Grant No. 863-2002AA306412).