

# 大有效面积的高 $T_c$ rf SQUID<sup>\*</sup>

刘新元<sup>1,2)</sup> 谢飞翔<sup>1)</sup> 孟树超<sup>1)</sup> 马 平<sup>1)</sup> 杨 涛<sup>1)</sup> 聂瑞娟<sup>1)</sup> 王守证<sup>1)</sup> 王福仁<sup>1)</sup> 戴远东<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 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)

<sup>2)</sup> 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  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$  的衬底上得到了有效面积为  $1.27\text{ mm}^2$ , 在磁通噪声为  $2.1 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$  时, 磁场灵敏度为  $34\text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$ . 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了很大进展<sup>[1-6]</sup>. 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  $A_{\text{eff}}$  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  $A_{\text{eff}}$  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<sup>[7]</sup> 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, 因此此

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 器件以提高系统的有效面积. Zhang<sup>[8]</sup> 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  $\times$  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<sup>[9]</sup> 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. 它兼作磁聚焦器. 外径  $\phi = 3.5\text{ mm}$  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  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的  $\text{LaAlO}_3$  衬底上, 中心线尺寸约为 8 mm, 配上内孔为  $10\text{ }\mu\text{m} \times 500\text{ }\mu\text{m}$ , 外径  $\phi = 3.5\text{ mm}$  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

<sup>\*</sup> 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.

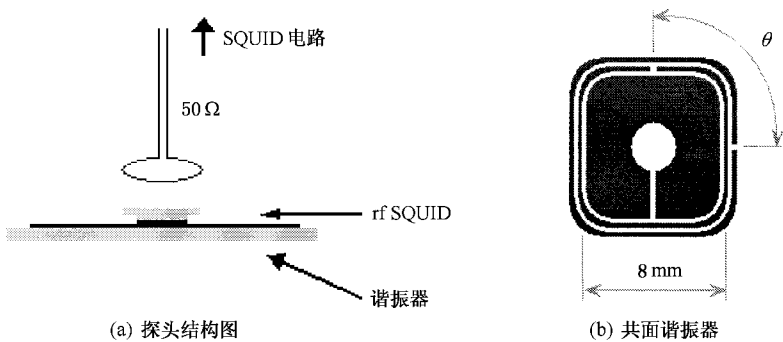


图 1 现有的高  $T_c$  rf SQUID 器件和超导薄膜谐振器及其耦合方式 ((a)中粗实线表示超导薄膜)

$\times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$  ,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  $1.3\text{--}1.5 \text{GHz}$  ,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,外径  $\phi = 3.5 \text{mm}$  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  $\kappa$  .

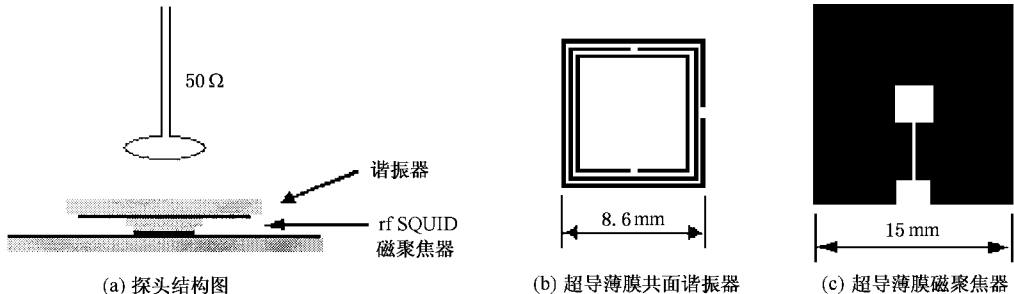


图 2 新型结构的超导共面谐振器、磁聚焦器及与 SQUID 器件的耦合方式示意图 ((a)中粗实线表示超导薄膜)

### 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  $\text{LaAlO}_3$  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, 即用胶、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 800 MHz 频段, 外环尺寸为 8.6 mm, 它制作在 10 mm × 10 mm 的  $\text{LaAlO}_3$  衬底上. 三条开口环的宽度均为 200  $\mu\text{m}$ , 开口大小是 50  $\mu\text{m}$ , 线间距离为 100  $\mu\text{m}$ , 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 740 MHz 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  $\text{LaAlO}_3$  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  $\mu\text{m}$  × 500  $\mu\text{m}$ , 制作在 5 mm × 5 mm 的  $\text{SrTiO}_3$  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 800 MHz 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  $\mu$  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 (800 Hz 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<sup>[10]</sup>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的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  $\mu\text{m}$  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  $2.8 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ .

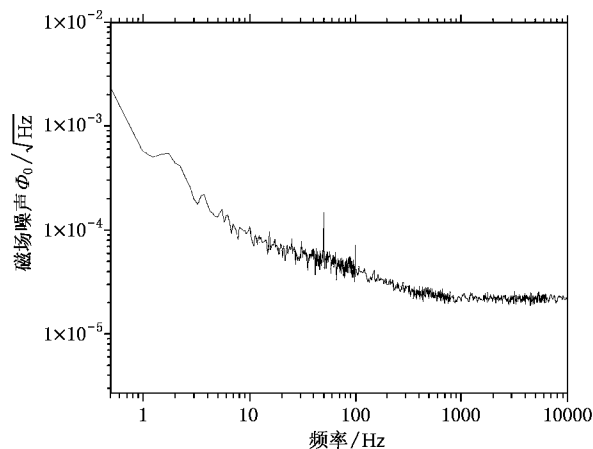


图 3 磁通噪声谱曲线

### 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 × 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  $A_{\text{eff}}$  只有 0.81  $\text{mm}^2$ , 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 1.3 GHz 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<sup>[11]</sup> .

[ 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 ] Tavrín Y , Zhang Y , Mueck M , Braginski A I and Heiden C 1993 *Phys . Lett .* **62** 1824

[ 9 ] Zhang Y , Zander W , Schuler J , Ruders F , Soltner H , Banzet M , Walters N , Zhang X H and Braginski A I 1997 *Appl . Phys . Lett .* **71** 704

[ 9 ] Zhang Y , Walters N , Zhang X H , Sochulert J , Zander W , Soltner H , Yi H R , Banzet M , Ruders F and Braginsk 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<sup>1)2)</sup> Xie Fei-Xiang<sup>1)</sup> Meng Shu-Chao<sup>1)</sup> Ma Ping<sup>1)</sup> Yang Tao<sup>1)</sup> Nie Rui-Juan<sup>1)</sup>

Wang Shou-Zheng<sup>1)</sup> Wang Fu-Ren<sup>1)</sup> Dai Yuan-Dong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>( National Laboratory for Mesoscopic Physics and Department of Physics , Peking University , Beijing 100871 ,China )

<sup>2)</sup>( 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  $1.27 \text{ mm}^2$  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 ).