

# 用于高温射频超导量子干涉器的 介质谐振器的性质研究\*

高 吉 杨 涛 马 平<sup>†</sup> 戴 远 东

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

(2009 年 11 月 10 日收到;2009 年 12 月 1 日收到修改稿)

介质谐振器是目前高温射频超导量子干涉器较常采用的一种高品质因数微波谐振器. 它是由  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 标准衬底及覆盖在其上的  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) 薄膜磁通聚焦器共同构成的. 为探明磁通聚焦器构形对介质谐振器谐振频率的影响, 本文采用 Ansoft 公司出品的 HFSS 高频结构仿真软件对磁通聚焦器构形不同的若干介质谐振器的谐振特性进行了仿真. 结果表明: 增大磁通聚焦器开缝宽度, 或者减小磁通聚焦器中心磁通聚焦孔半径, 都会造成介质谐振器谐振频率升高. 为验证仿真结果的可信性, 抽样制备了一些介质谐振器并实际测量了它们的谐振特性, 实测结果与仿真结果基本一致. 研究表明, 改变磁通聚焦器构形是调节介质谐振器谐振频率的一种有效方法.

**关键词:** 介质谐振器, 高温射频超导量子干涉器, HFSS 软件

**PACC:** 7490, 7790

## 1. 引 言

射频超导量子干涉器 (RF SQUID) 通常是指仅包含一个约瑟夫森结的超导环. 该单结超导环在工作时需要与一个被射频信号驱动的谐振器通过互感耦合起来. 这样, 当超导环中的外加磁通发生变化时, 谐振器的输出电压会随之发生变化.

早在 20 世纪 70 年代初期, 应用传统金属超导材料制备的工作于液氮温度的低温射频超导量子干涉器 (低  $T_c$  RF SQUID) 就已经显示出了一定的实用价值<sup>[1]</sup>. 然而, 由于其磁通噪声和能量分辨率水平在 20 世纪 80 年代时逐渐逊色于低温直流超导量子干涉器 (低  $T_c$  DC SQUID), 它渐渐不为人们所关注.

1986 年超导转变温度 ( $T_c$ ) 高于液氮沸点 ( $\sim 77\text{ K}$ ) 的高温超导材料的出现<sup>[2,3]</sup>, 唤起了人们研究 RF SQUID 的新热情. 从那时起, 利用  $T_c$  约为  $90\text{ K}$  的  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) 制备可工作在液氮沸点温度

的高温射频超导量子干涉器 (高  $T_c$  RF SQUID), 成为超导电子学界关注的一个重要课题. 最近二十几年来, YBCO 高  $T_c$  RF SQUID 不断发展<sup>[4-11]</sup>, 逐渐形成了如下较为成熟的设计方案. 即以 YBCO  $c$  轴外延薄膜制备垫圈型 RF SQUID 器件, 并配以谐振频率在  $1\text{ GHz}$  以下的高品质因数微波谐振器<sup>[12]</sup>.

到目前为止, 共出现了三类较为优良的高  $T_c$  RF SQUID 用微波谐振器, 它们是共面谐振器<sup>[8]</sup>、梳齿谐振器<sup>[9]</sup>和介质谐振器<sup>[10]</sup>. 这三种谐振器都需要利用高品质的 YBCO  $c$  轴外延薄膜来制成. 其中, 共面谐振器和梳齿谐振器通常制备在介电常数较低的  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) 单晶衬底上. 共面谐振器由一个大面积的 YBCO 磁通聚焦垫圈及环绕着它的两条同心 YBCO 微带共同组成; 梳齿谐振器由一个两末端为梳齿状结构的非闭合 YBCO 薄膜外环构成. 对于这两种谐振器的特性, 人们已经通过理论计算和实际测量进行了较为深入的研究<sup>[9,13-15]</sup>. 这两种谐振器的谐振频率一般在  $800\text{—}900\text{ MHz}$  之间, 空载品质因数可达几千, 和 SQUID 耦合之后的有载品质因数一般约为  $200\text{—}300$ . 与这两种谐振器相耦合的

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB601007)、国家自然科学基金 (批准号: 10674006)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA03Z238) 和通信系统信息控制技术国家重点实验室基金 (批准号: 9140C1304010803) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: maping@pku.edu.cn

YBCO 高  $T_c$  RF SQUID 可以呈现相当低的磁通白噪声(典型值约为  $1 \times 10^{-5} \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ ), 但是其磁通低频噪声仍然不是十分理想. 为使 YBCO 高  $T_c$  RF SQUID 在低频段具有更低的磁通噪声, 人们近来经常使用另外一种性能较好的高品质因数微波谐振器——介质谐振器. 介质谐振器是由  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 标准衬底及覆盖在其上的利用 YBCO  $c$  轴外延薄膜制成的磁通聚焦器共同构成的. 由于 STO 极高的介电常数有利于射频场聚集在 STO 衬底之中, 采用了介质谐振器的 YBCO 高  $T_c$  RF SQUID, 其射频场分布受周围物体的影响较小, 这样, 其工作点易于保持稳定, 从而使其磁通低频噪声得到大幅降低<sup>[10]</sup>. 介质谐振器的空载品质因数也可高达几千. 但是关于其谐振频率的特性至今尚未出现十分详细的报道. 虽然 He 等<sup>[16]</sup>曾经利用 SONNET SUITES 高频电磁软件对一个磁通聚焦孔半径为  $750 \mu\text{m}$ 、磁通聚焦器开缝宽度为  $500 \mu\text{m}$  的介质谐振器进行过频率仿真, 并且和实测结果进行过对比, 但是至今并未有文献详细报道过介质谐振器谐振频率与磁通聚焦器构形之间的关系.

为探明磁通聚焦器构形对介质谐振器谐振频率的影响, 本文采用 Ansoft 公司出品的 HFSS 高频结构仿真软件对若干具有不同磁通聚焦器构形的介质谐振器进行了频率仿真, 并且通过实际测量对仿真结果进行了抽样检测. 下面对仿真和实测的内容进行具体介绍.

## 2. 实验方法

Ansoft 公司出品的 HFSS 高频结构仿真软件是基于有限元法 (FEM) 和自适应网格划分的全波电磁仿真软件. 它以四面体为基本的网格单元, 适合于模拟任意形状的三维无源器件.

我们采用 HFSS 的本征模求解器对磁通聚焦孔半径为  $500 \mu\text{m}$ 、磁通聚焦器开缝宽度在  $100\text{—}500 \mu\text{m}$  之间的若干介质谐振器, 以及磁通聚焦器开缝宽度为  $500 \mu\text{m}$ 、磁通聚焦孔半径在  $500\text{—}1000 \mu\text{m}$  之间的若干介质谐振器进行了仿真.

对各介质谐振器进行仿真时所建的模型如图 1 所示. 设  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的 STO 衬底位于一液氮柱体中央, 而液氮位于真空背景之中. 由于该液氮柱体的各个外表面会被程序自动当作是具有理想导电性质的边界, 令该液氮柱体的各个外表面

都离 STO 衬底足够远(取液氮直径为  $100 \text{ mm}$ , 令液氮上下表面与 STO 相距  $25 \text{ mm}$ ), 这样在仿真的过程中它们就不会对介质谐振器的谐振特性造成影响. 为在仿真过程中节约内存, 设 YBCO 磁通聚焦器是厚度为  $0$  的薄片. 基于 YBCO 材料的超导性质, 设模型中的 YBCO 薄片具有理想的导电性能. 而模型中 STO 和液氮的材料属性, 则根据经验设定为: STO 的介电常数  $\epsilon_{\text{STO}(77 \text{ K})} = 2000$ , STO 的介电损耗  $\tan\delta_{\text{STO}(77 \text{ K})} = 3 \times 10^{-4}$ ; 液氮的介电常数  $\epsilon_{\text{N}_2} = 1.4$ .

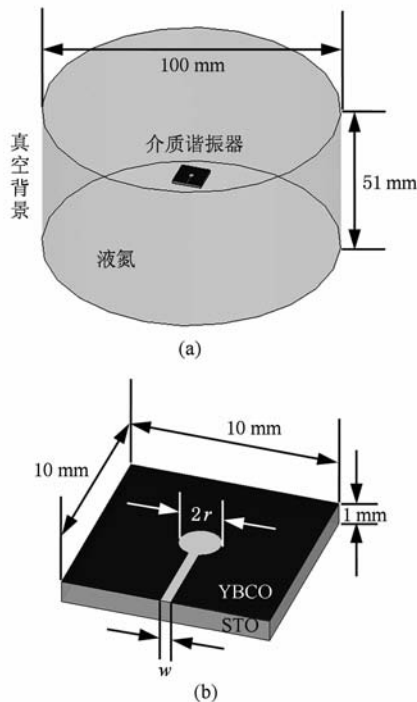


图 1 用 HFSS 仿真介质谐振器 (a) 用本征模求解器仿真时所建的模型, (b) 图 (a) 中介质谐振器的放大示意图 ( $w$  是 YBCO 磁通聚焦器的开缝宽度,  $r$  是磁通聚焦孔的半径)

我们对各介质谐振器求解了其在微波频率范围内最低的那个谐振频率(即求解了各介质谐振器不低于  $300 \text{ MHz}$  的第一个谐振频率). 在对各介质谐振器进行仿真时, 为保证计算结果的精确性, 令自适应网格加密的标准是后一遍计算比前一遍计算增加约  $20\%$  的网格数, 令判定计算收敛的标准是后一遍计算出的频率与前一遍计算出的频率相比变化幅度不超过  $0.01\%$ , 并且将最小的收敛次数设定为  $2$ , 这样只有当程序连续两次达到收敛标准时才能结束仿真过程.

在对各介质谐振器进行仿真之后, 为检验仿真结果的可信性, 我们实际制备了一些介质谐振器,

将它们实测谐振频率和仿真结果进行了对比.

制备介质谐振器的方法如下:用脉冲激光沉积(PLD)法在  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的(100)STO衬底上沉积出厚度大约为  $200\text{ nm}$  的YBCO  $c$  轴外延薄膜,然后利用紫外光刻和磷酸腐蚀的方法将所生长的YBCO薄膜刻蚀成磁通聚焦器.

实际测量介质谐振器谐振频率的方法如下:利用以单匝铜线圈(外径  $7\text{ mm}$ ,内径  $5\text{ mm}$ )为发射接收线圈、以  $50\ \Omega$  同轴线为传输线的单端口系统,用反射法对介质谐振器的谐振频率进行测量,调节介质谐振器和铜线圈之间的距离,使测得的谐振吸收峰尽可能深,记录谐振峰最深时谐振曲线最低点对应的频率,即测得了介质谐振器的谐振频率.

实际测得的介质谐振器谐振频率以及用计算机仿真出的介质谐振器谐振频率如下.

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 磁通聚焦孔半径 $r = 500\ \mu\text{m}$ , 改变磁通聚焦器开缝宽度 $w$

对于磁通聚焦孔半径  $r = 500\ \mu\text{m}$ ,磁通聚焦器开缝宽度  $w = 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500\ \mu\text{m}$  的介质谐振器,用 HFSS 仿真之后得到如图 2 所示的谐振频率.为便于比较,我们将抽样制备并测量的相关结果也列在图 2 中.

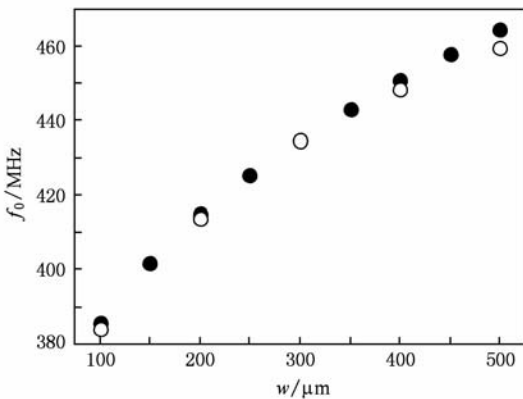


图 2 磁通聚焦孔半径  $r = 500\ \mu\text{m}$ ,磁通聚焦器开缝宽度  $w = 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500\ \mu\text{m}$  的介质谐振器的谐振频率  $f_0$ . ● 为用 HFSS 仿真得到的结果,○ 为实际测量得到的结果

由图 2 中的仿真结果可见,这些磁通聚焦孔半径  $r$  同为  $500\ \mu\text{m}$  的介质谐振器,它们的谐振频率  $f_0$

具有随磁通聚焦器开缝宽度  $w$  增加而上升的趋势.

将图 2 中实际测量所得的结果与计算仿真所得的结果相比较,可以发现二者基本一致.这表明用 HFSS 仿真得到的结果比较可信.

#### 3.2. 磁通聚焦器开缝宽度 $w = 500\ \mu\text{m}$ , 改变磁通聚焦孔半径 $r$

对于磁通聚焦器开缝宽度  $w = 500\ \mu\text{m}$ ,磁通聚焦孔半径  $r = 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000\ \mu\text{m}$  的介质谐振器,用 HFSS 仿真之后得到如图 3 所示的谐振频率.为便于比较,我们将抽样制备并测量的相关结果也列在图 3 中.

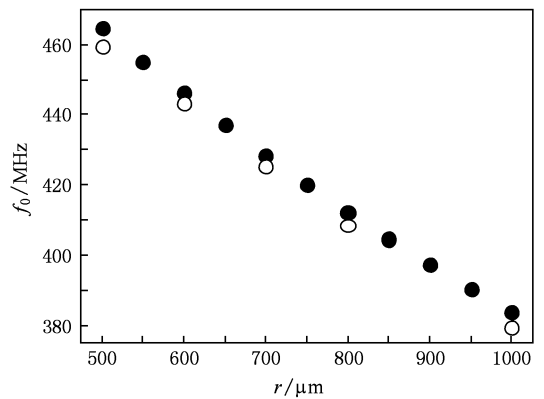


图 3 磁通聚焦器开缝宽度  $w = 500\ \mu\text{m}$ ,磁通聚焦孔半径  $r = 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000\ \mu\text{m}$  的介质谐振器的谐振频率. ● 为用 HFSS 仿真得到的结果,○ 为实际测量得到的结果

由图 3 中的仿真结果可见,这些磁通聚焦器开缝宽度  $w$  同为  $500\ \mu\text{m}$  的介质谐振器,它们的谐振频率  $f_0$  具有随磁通聚焦孔半径  $r$  增加而下降的趋势.

将图 3 中实际测量所得的结果与计算仿真所得的结果相比较,可以发现二者基本一致.这表明我们用 HFSS 仿真得到的结果比较可信.

### 4. 结 论

本文比较系统地研究了高  $T_c$  RF SQUID 所用介质谐振器的谐振频率与其磁通聚焦器构形之间的关系.采用 Ansoft 公司出品的 HFSS 高频结构仿真软件,计算了若干具有不同磁通聚焦器构形的介质谐振器的谐振频率;同时,抽样制备了一些介质谐振器并实际测量了它们的谐振频率,得到了与仿真

结果基本一致的实测数据. 我们的研究表明磁通聚焦器的磁通聚焦孔半径  $r$  和开缝宽度  $w$  是影响介质谐振器谐振频率  $f_0$  的重要因素: 当磁通聚焦器中心磁通聚焦孔的半径  $r$  固定时, 介质谐振器的谐振频率  $f_0$  将随磁通聚焦器开缝宽度  $w$  的增加而提高; 而

当磁通聚焦器的开缝宽度  $w$  固定时, 介质谐振器的谐振频率  $f_0$  将随磁通聚焦孔半径  $r$  的增加而降低. 由此, 改变磁通聚焦器构形是调节高  $T_c$  RF SQUID 所用介质谐振器谐振频率的一种有效方法.

- [1] Cohen D, Edelsack E A, Zimmerman J E 1970 *Appl. Phys. Lett.* **16** 278
- [2] Bednorz J G, Müller K A 1986 *Z. Phys. B: Condens. Matter* **64** 189
- [3] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J, Hor P H, Meng R L, Gao L, Huang Z J, Wang Y Q, Chu C W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 908
- [4] Zimmerman J E, Beall J A, Cromar M W, Ono R H 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 617
- [5] Daly K P, Dozier W D, Burch J F, Coons S B, Hu R, Platt C E, Simon R W 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 543
- [6] Zhang Y, Mück H M, Herrmann K, Schubert J, Zander W, Braginski A I, Heiden C 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 645
- [7] Zhang Y, Mück M, Braginski A I, Toepfer H 1994 *Supercond. Sci. Technol.* **7** 269
- [8] Zhang Y, Zander W, Schubert J, Rüdgers F, Soltner H, Banzet M, Wolters N, Zeng X H, Braginski A I 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 704
- [9] Xie F X, Yang T, Ma P, Nie R J, Liu L Y, Wang F R, Wang S Z, Wang S G, Dai Y D 2002 *CN Patent* CN1352469 [2002-06-05] (in Chinese) [谢飞翔、杨涛、马平、聂瑞娟、刘乐园、王福仁、王守证、王世光、戴远东 2002 中国专利 CN1352469 [2002-06-05]]
- [10] Zhang Y, Schubert J, Wolters N, Banzet M, Zander W, Krause H J 2002 *Physica C* **372—376** 282
- [11] Liu X Y, Xie F X, Meng S C, Ma P, Yang T, Nie R J, Wang S Z, Wang F R, Dai Y D 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2580 (in Chinese) [刘新元、谢飞翔、孟树超、马平、杨涛、聂瑞娟、王守证、王福仁、戴远东 2003 物理学报 **52** 2580]
- [12] Clarke J, Braginski A I 2004 *The SQUID Handbook* (Volume 1) (Weinheim: Wiley-VCH) p230
- [13] Yi H R, Zhang Y, Braginski A I 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2357
- [14] Yi H R, Zhang Y, Bousack H, Braginski A I 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 4400
- [15] Mao H Y, Wang F R, Meng S C, Mao B, Li Z Z, Nie R J, Liu X Y, Dai Y D 2005 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **27** 269 (in Chinese) [茅海炎、王福仁、孟树超、毛博、李壮志、聂瑞娟、刘新元、戴远东 2005 低温物理学报 **27** 269]
- [16] He D F, Itozaki H 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 123911

# Characteristics of dielectric resonators for high-transition-temperature radio frequency superconducting quantum interference devices<sup>\*</sup>

Gao Ji Yang Tao Ma Ping<sup>†</sup> Dai Yuan-Dong

(State Key Laboratory for Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 10 November 2009; revised manuscript received 1 December 2009)

## Abstract

At present, the high-transition-temperature radio frequency superconducting quantum interference device (High- $T_c$  RF SQUID) is usually coupled to a dielectric resonator which is a standard 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  1 mm SrTiO<sub>3</sub> (STO) substrate with a YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  (YBCO) thin-film flux focuser deposited on it. The dielectric resonator for the High- $T_c$  RF SQUID has a high quality factor and a resonant frequency in the microwave range. In order to find out the effect of the flux focuser's geometry on the dielectric resonator's resonant frequency, we used ANSOFT high frequency structure simulator (ANSOFT HFSS) to simulate the resonance characteristics of some dielectric resonators with different flux focuser geometries. Our simulation results show that when the width of the flux focuser's slit increases or the radius of the flux focuser's inner hole decreases, the dielectric resonator's resonant frequency increases. To estimate the reliability of our simulation results, we selectively prepared a few dielectric resonators and measured their resonance characteristics. The experimental results are virtually consistent with the simulation results. Our study shows that changing the flux focuser geometry is an effective way to adjust the dielectric resonator's resonant frequency.

**Keywords:** dielectric resonator, high-transition-temperature radio frequency superconducting quantum interference device, high frequency structure simulator

**PACC:** 7490, 7790

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB601007), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10674006), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z238), and the Foundation of the State Key Laboratory of Information Control Technology for Communication System, China (Grant No. 9140C1304010803).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: maping@pku.edu.cn