

用于射频超导量子干涉器的新型单 CSRR 磁通聚焦器和谐振器*

王杨婧^{1)†} 谢拥军²⁾ 雷振亚¹⁾

1) (天线与微波技术重点实验室, 西安电子科技大学, 西安 710071)

2) (北京航空航天大学, 北京 100191)

(2011 年 8 月 5 日收到; 2011 年 9 月 21 日收到修改稿)

文提出了一种新型磁通聚焦器和谐振器. 磁通聚焦器引入了单互补开环谐振器结构(单 CSRR); 谐振器则采用环绕着磁通聚焦器的发夹型 3 阶阶梯阻抗谐振器(SIR). 采用 ANSYS HFSSv.11 高频结构仿真软件对提出的磁通聚焦器和谐振器进行了仿真, 并对单 CSRR 进行了理论分析. 仿真和理论分析表明: 单 CSRR 的引入, 提高了磁通聚焦器的聚磁效果, 改善了磁通聚焦器与 RF SQUID 垫圈的耦合(耦合系数 k_{sc} 为引入单 CSRR 前的 2 倍), 并且有效面积增大到 1.227 mm^2 .

关键词: 射频超导量子干涉器(RF SQUID), 磁通聚焦器, 阶梯阻抗谐振器(SIR), HFSS

PACS: 42.60.Da, 76.90.+d, 85.25.Dq

1 引言

射频超导量子干涉器(radio frequency superconducting quantum interference device, RF SQUID)是指仅包含一个约瑟夫森结的超导环. 随着高温超导的制备工艺不断发展, 最为常用的是以 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) c 轴外延薄膜制备在 LaAlO_3 (LAO) 衬底上的 RF SQUID 垫圈.

RF SQUID 垫圈需要通过互感与谐振回路耦合在一起, 谐振回路由一个振荡在谐振频率 $f_0 = \omega_0/2\pi$ 的射频电流驱动, 工作时需满足^[1]

$$k^2 Q_L \approx 1. \quad (1)$$

其中, k^2 为 RF SQUID 与谐振回路的耦合系数, 它等于储存在 RF SQUID 中的磁场能量与储存在谐振回路中的能量之比; Q_L 为谐振回路有载品质因数, 需要一个高的空载品质因数 Q_0 来满足稳定工作条件, 且要求谐振回路与器件之间的耦合系数 k^2 较小.

一般的谐振回路可以选择谐振频率在 1 GHz 以下的高品质因数谐振器, 如共面谐振器^[2-4], 梳

齿谐振器^[5,6] 和介质谐振器^[7,8]. 共面谐振器与梳齿谐振器大多以 YBCO c 轴外延薄膜生长在介电常数较低的 LAO 单晶衬底上^[2-6]; 介质谐振器则可以制备在 LAO^[7] 或介电常数极高的 SrTiO_3 (STO) 的衬底上^[8].

SQUID 实质上是一种磁通传感器, 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, 因此它能将磁场的微小变化转换为可测量的电压, 是目前为止测量磁场灵敏度最高的仪器, 广泛地应用于生物磁测量^[9], 大地测量^[10], 无损损伤^[11] 以及军用电子装备中^[12].

RF SQUID 系统的磁场灵敏度性能与系统的磁通噪声 $S_\Phi^{1/2}$ 和器件的有效面积 A_{eff} 有关^[13,1], 即

$$S_B^{1/2} = S_\Phi^{1/2} / A_{\text{eff}}, \quad (2)$$

$$A_{\text{eff}} = \Phi_0 / B_\Phi, \quad (3)$$

式中 $S_B^{1/2}$ 是磁通噪声谱密度 ($\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$), 磁通噪声越小, 有效面积越大, 灵敏度就越高. A_{eff} 是 SQUID 磁场 - 磁通转换系数的倒数.

共面谐振器^[2-4] 是由一个磁通聚焦器及环绕

* 通信系统信息控制技术国家级重点实验室基金(批准号: 9140C1304021003)资助的课题.

† E-mail: piratewyj@yahoo.com.cn

着它的两条同心微带共同组成. 其中, 磁通聚焦器是利用超导薄膜的抗磁性, 将 RF SQUID 垫片上超导薄膜耦合的磁通聚焦到 RF SQUID 的环孔中, 相当于增加了有效面积. 因此, 磁通聚焦器的聚磁效果越好, 与 RF SQUID 的耦合系数 k_{sc} 越高, 器件的有效面积就越大.

Zhang 等人 [2,3] 开发的共面谐振器, 当 RF SQUID 垫圈外径为 3.5 mm, 内孔为 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 时, 相应的有效面积主要是由磁通聚焦器的尺寸决定, 为 0.535 mm^2 . 孟树超等人 [14] 将磁通聚焦器改为细环线 (即接近器件的“本征面积”), 有效面积增大到 0.635 mm^2 , 但是它空载品质因数 Q_0 很低, 器件的灵敏度不高; 刘新元等人 [15] 在孟树超的基础上加入一个大面积磁通聚焦器, 有效面积增大到 1.27 mm^2 , 但是 RF SQUID 系统由两层变为三层, 结构变得更加复杂.

梳齿谐振器由一个两末端为梳齿状结构的非闭合外环 [5] 或者由磁通聚焦器及环绕它的末端为梳齿状的外环共同构成 [6], 它的谐振点比较集中, 谐振时的电流分布很不均匀, 故而空载品质因数 Q_0 相对较低 (约为 1200) [6].

介质谐振器则是由磁通聚焦器本身构成 [7,8], 由于依靠磁通聚焦器本身来产生谐振, 所以工作在谐振频率时它与 RF SQUID 的耦合效

率 k^2 较高 [7,8].

结合上述磁通聚焦器和谐振器的尺寸特征以及 RF SQUID 的系统要求, 本文提出了一种新型磁通聚焦器和谐振器, 并且使用软件 ANSYS HFSSv.11 进行了建模仿真分析. 磁通聚焦器引入了单互补开环谐振器结构 (单 CSRR); 谐振器则采用环绕着磁通聚焦器的发夹型 3 阶阶梯阻抗谐振器 (SIR). 它们均以 YBCO c 轴外延薄膜生长在大小为 $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ 的 LAO 衬底上, 谐振频率为 820 MHz, 空载品质因数为 26439, 有效地提高了磁通聚焦器的聚磁效果, 改善了 RF SQUID 垫圈与磁通聚焦器的耦合, 从而使得有效面积增大了 2.4 倍, 提高了器件的灵敏度.

2 模型及仿真

美国 ANSYS 公司的 HFSS (high frequency structure simulator) 是基于电磁场有限元方法 (FEM) 的三维电磁仿真软件. 其激励求解模式可以计算无源、高频结构的 S 参数; 其本征模求解模式可以用来计算微波结构的谐振频率及在这些谐振频率处的对应场, 也可以计算谐振器的空载品质因数 Q_0 [16]. 本文采用 ANSYS HFSSv.11 对提出的新型磁通聚焦器和谐振器进行建模仿真分析.

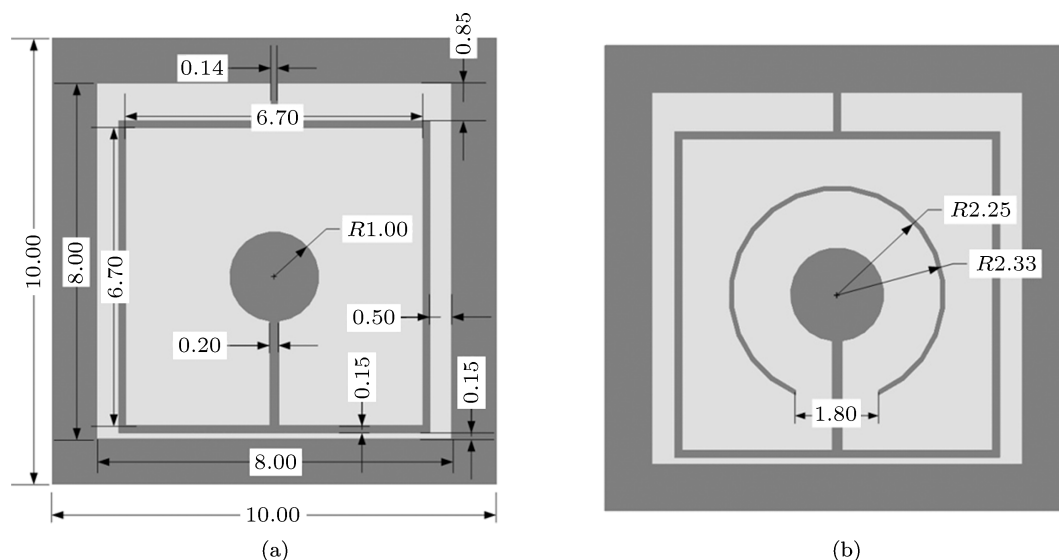


图 1 磁通聚焦器和谐振器的平面尺寸图 (单位为 mm) (a) 模型一磁通聚焦器 1 和 3 阶 SIR; (b) 模型二磁通聚焦器 2 和 3 阶 SIR

模型一如图 1(a) 所示, 传统磁通聚焦器 (磁通聚焦器 1) 和用于 RF SQUID 的发夹型 3 阶 SIR 谐振器均以 YBCO c 轴外延 200 nm 制备在在 LAO

衬底上, 薄膜的转变温度约为 105 K, 临界电流密度 $J_c \approx 2.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$. 其中, LAO 衬底为 $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$. 发夹型 3 阶 SIR 的外围尺

寸和内围尺寸分别为 $8 \times 8 \text{ mm}^2$ 和 $7.6 \times 7.6 \text{ mm}^2$; 3 阶对应的宽度分别为 0.15 mm, 0.5 mm, 0.85 mm. 将传统的磁通聚焦器放置在谐振器的中心位置, 距离谐振器四条内边均为 0.15 mm, 其磁通聚焦孔半径为 1 mm, 磁通聚焦器开缝宽度为 0.2 mm.

模型二如图 1(b) 所示, 保持图 1 中的基本尺寸不变, 在磁通聚焦器表面引入单 CSRR (磁通聚焦器 2), 谐振环的内外径分别为 2.33 mm 和 2.25 mm, 开口宽度为 1.8 mm.

仿真时, 基于 YBCO 是厚度仅为 200 nm 的超导薄膜, 设模型中的 YBCO 薄膜为具有理想导电性的零厚度薄片. 根据经验^[4], 77 K, 800 MHz 时 LAO 衬底的介电常数 $\epsilon_r = 24$, 介电损耗 $\tan\delta = 4 \times 10^{-5}$. 将建好的模型放置于 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 的理想导体谐振腔内. 空腔的谐振频率是 22260 MHz, 远远大于磁通聚焦器和谐振器的谐振频率, 故不会影响磁通聚焦器和谐振器的谐振频率.

3 结果与讨论

3.1 仿真结果讨论

模型一和模型二的谐振频率均为 820 MHz, 空载品质因数 Q_0 分别为 27075 和 26439. 模型一和

模型二的仿真结果说明: 单 CSRR 的引入没有改变磁通聚焦器和谐振器的谐振频率, 并且对 Q_0 的影响也很小.

一方面, 磁通聚焦器是利用超导薄膜的抗磁性, 将 RF SQUID 垫片上超导薄膜耦合的磁通聚焦到 RF SQUID 的环孔中, 相当于增加了有效面积. 因此, 磁通聚焦器的聚磁效果越好, 与 RF SQUID 的耦合系数 k_{sc} 越高, 器件的有效面积就越大.

而磁通聚焦的聚磁特性主要体现在它表面涡流损耗的大小, 涡流损耗越小, 聚磁特性越好^[1]; 表面涡流可以感应出磁场, 所以可以直观的从它表面的磁场密度大小来研究其聚磁特性. 图 2 给出了引入单 CSRR 前后磁通聚焦器的磁场密度分布图, 磁场密度值的范围为 $1.95 \times 10^{-5} \sim 1.05 \times 10^{-3} \text{ A/m}$, 随着颜色的加而减小, 图中的黑色实线为等磁位线.

如图 2(a) 所示, 模型一的磁场分布几乎覆盖了整个磁通聚焦器的表面, 但是在磁通聚焦器四个角附近又有很大的几块弱场区; 如图 2(b) 所示, 模型二的磁场主要集中在单 CSRR 内径和磁通聚焦孔之间的环内, 而在单 CSRR 外径和磁通聚焦器边缘处形成了一个隔离带, 所以模型二将磁场很好地集中在了单 CSRR 和磁通聚焦孔所确定的范围内, 并且分布非常对称.

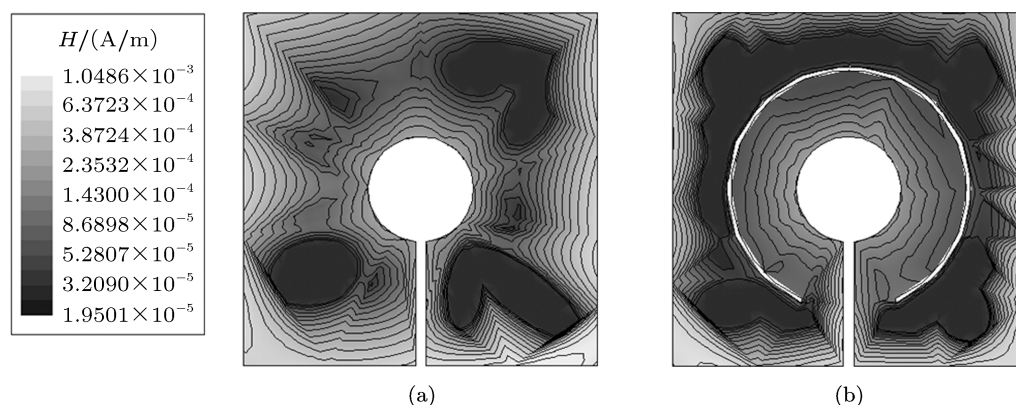


图 2 磁通聚焦器表面的磁场密度分布 (a) 模型一的分佈图; (b) 模型二的分佈图

实际应用时, 磁通聚焦器和谐振器需要与 RF SQUID 垫圈耦合, 常见 RF SQUID 垫圈尺寸为 3.5 mm, 耦合的水平位置及其方式如图 3(a), (b) 所示: 磁通聚焦器的磁通聚焦孔中心点与 RF SQUID 垫圈的中心对准, 即 RF SQUID 垫圈的直径在水平位置的投影如左图中实线所示; 并且在垂直位置上两者相距 $5 \mu\text{m}$ ^[4].

图 3(c) 给出了磁通聚焦器水平位置线上的磁场密度曲线, 水平位置线以磁通聚焦孔中心为零点, 为了反映磁通聚焦器的聚磁效果, 选取 RF SQUID 垫圈的 3.5 mm 作为其长度.

由图 3(c) 易知, 传统磁通聚焦器 (磁通聚焦器 1) 的磁场密度值在零点附近发生了三次非常明显的跃变 (尖细的脉冲), 且在 1 mm—1.75 mm 处

有个很大的跃变,这必然会影响到与 RF SQUID 垫圈的耦合效果:脉冲使得 RF SQUID 垫片上超导薄膜耦合的磁通很难聚焦到 RF SQUID 的环孔中;而 1—2 mm 处的陡变很可能会造成磁通聚焦器耦合到 RF SQUID 垫圈的磁通量左右分布不均.

引入单 CSRR 结构后(磁通聚焦器 2),水平位置线上的磁场密度关于零点基本对称,且没有明显

的突变点,能量分布均匀且较为集中.所以,采用模型二的方案制备的磁通聚焦器和谐振器将在很大程度上改善与 RF SQUID 的耦合性能:模型二的 k_{sc} 为 8.59×10^{-2} ,模型一的 k_{sc} 为 4.28×10^{-2} .可见引入 CSRR 后,耦合系数 k_{sc} 是引入前的 2 倍,有效面积由引入 CSRR 前的 0.51 mm^2 增大为 1.227 mm^2 ,提高了 SQUID 磁通传感器的灵敏度.

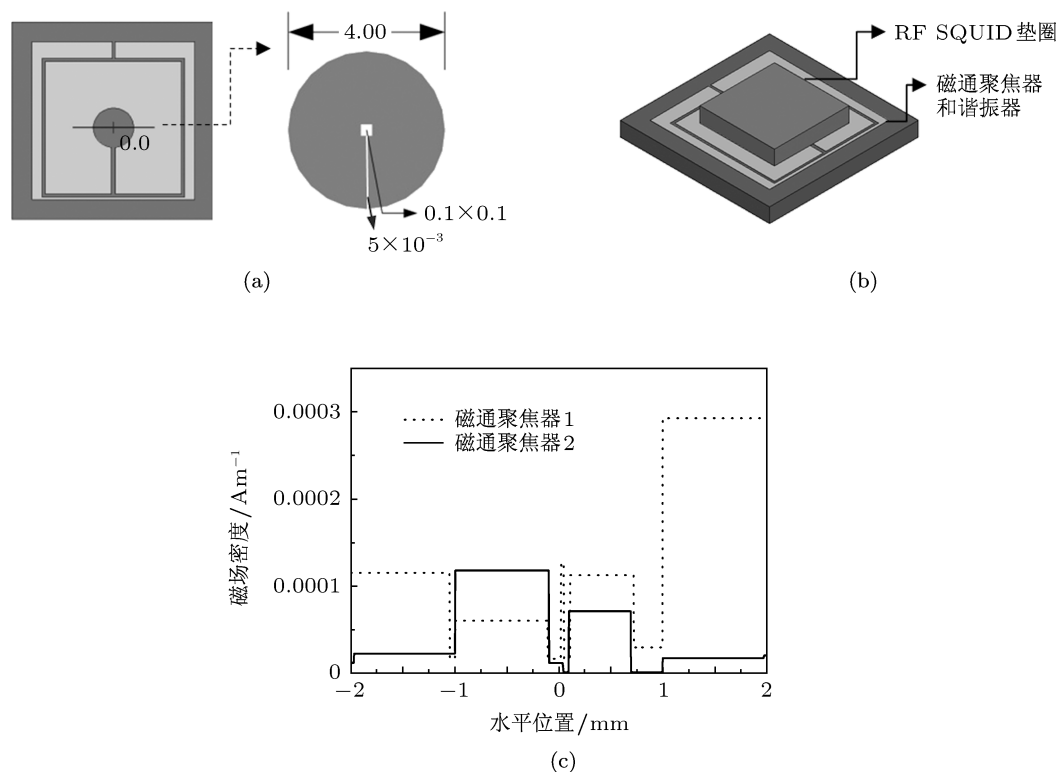


图 3 磁通聚焦器水平位置线上的磁场密度变化曲线 (a) RF SQUID 垫圈(右)及耦合的水平位置(左)/mm; (b) 耦合位置示意图; (c) 水平位置线的磁场密度分布曲线

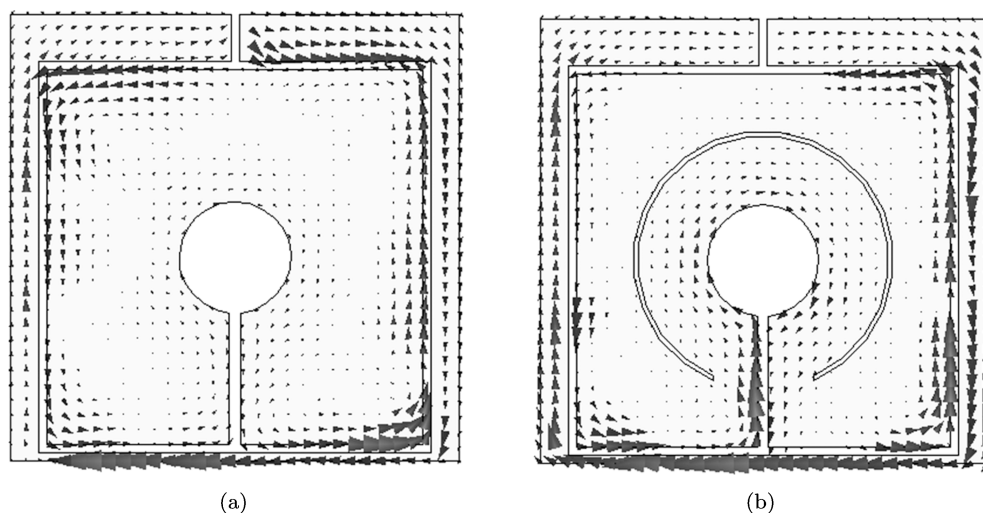


图 4 谐振时磁通聚焦器与 3 阶 SIR 表面的电流分布 (a) 模型一, (b) 模型二

另一方面, 要求 RF SQUID 垫圈与谐振器的耦合系数 k^2 较小. 引入 CSRR 后的磁通聚焦器, 其边缘和 CSRR 环之间有一个隔离带, 削弱了 RF SQUID 垫圈与 3 阶 SIR 的耦合, 耦合系数 k^2 为 3.9×10^{-3} , 比引入 CSRR 前的耦合系数 ($k^2 = 6.82 \times 10^{-3}$) 减小到原来的 1/1.75. 而现有的磁通聚焦器与 RF SQUID 垫圈的耦合系数约为 8.4×10^{-3} [4].

可见, 模型一与现有的磁通聚焦器和共面谐振器 [4] 特性基本一样, 只是在空载品质因数方面有一定的提高; 而模型二由于有 CSRR 的引入, 它不仅在空载品质因数方面有一定的提高, 而且磁通聚焦器的聚磁特性方面有很大的提高, 所以能极大地改善耦合系数 k_{sc} , 增大了器件的有效面积, 提高了系统的灵敏度.

为进一步研究单 CSRR 对磁场分布的影响机理, 我们对谐振时磁通聚焦器和 3 阶 SIR 的表面电流进行了监控, 如图 4 所示.

RF SQUID 垫圈与磁通聚焦器的耦合主要是由磁通聚焦器的分布电流来决定 [18], 由图 4 容易看出, 单 CSRR 的引入, 明显增强了磁通聚焦孔附近的电流分布, 增强了磁通聚焦器的聚磁效果.

3.2 理论分析

单 CSRR 是指仅刻蚀在介质基片上的开口环的谐振器, 如图 5 所示. 单 CSRR 谐振时产生带阻效应, 会出现一个非常强的谐振吸收峰, 所以可以改变谐振器的表面电流分布. 单 CSRR 的谐振频率为 [17]

$$f_{\text{notch}} = c / \left[(L_{\text{inner}} + L_{\text{outer}}) \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} \right], \quad (4)$$

其中, c 为光速; L_{inner} , L_{outer} 为谐振环的内边缘和外边缘长度; ε_{eff} 为介质的有效介电常数, 约为 $\varepsilon_r/2$.

本文中, 考虑到磁通聚焦器和 RF SQUID 垫圈尺寸大小, 首先确定单 CSRR 的内径尺寸为 2.25 mm. 由于仿真时建好的模型需放置于谐振频率是 22260 MHz 的理想导体谐振腔内, 所以

在不影响磁通聚焦器和发夹型 3 阶 SIR 谐振频率 (820 MHz) 的前提下, 要求单 CSRR 的谐振频率应该远远小于 22260 MHz, 也要远远大于 820 MHz, 所以初步确定单 CSRR 的谐振频率为 3500 MHz, 即外径尺寸为 2.30 mm. 通过仿真微调, 最终确定为 2.33 mm.

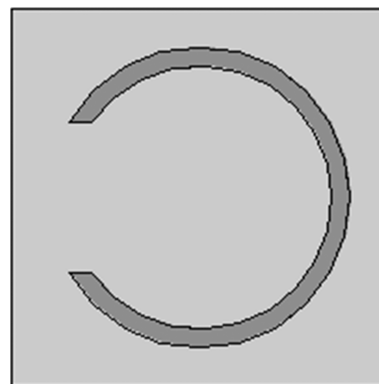


图 5 单 CSRR

4 结论

本文提出了一种新型磁通聚焦器和谐振器. 磁通聚焦器引入了单互补开环谐振器结构 (单 CSRR); 谐振器则采用环绕着磁通聚焦器的发夹型 3 阶阶梯阻抗谐振器 (SIR). 主要从仿真和理论两个方面进行了验证和分析. 文章采用 ANSYS HFSSv.11 高频结构仿真软件对提出的新型磁通聚焦器和谐振器进行了仿真, 并在谐振时与传统的磁通聚焦器和谐振器进行了多方面的比较: 空载品质因数、磁通聚焦器的磁场密度分布、与 RF SQUID 垫圈的耦合系数, 耦合 RF SQUID 垫圈位置处的磁场密度大小、有效面积、表面电流分布等. 同时又从理论分析入手, 研究了发夹型 3 阶 SIR 的谐振机理和单 CSRR 的影响机理. 仿真和理论分析的结果表明: 引入 CSRR 的新型磁通聚焦器和谐振器, 改善了磁通聚焦器与 RF SQUID 垫圈的耦合 (耦合系数 k_{sc} 提高了一倍), 从而使有效面积增大到 1.227 mm^2 , 提高了器件灵敏度.

- [1] Clarke J, Braginski A I 2004 *The SQUID Handbook* (Volume I) p12
 [2] Zhang Y, Zander W, Schubert J 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 704
 [3] Zhang Y, Wolters N, Zeng X H 1998 *IEEE Trans. Appl. Super-*

- cond.* **6** 385
 [4] Yi H R, Zhang Y, Bousack H, Braginski A I 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 4400
 [5] Xie F X, Yang T, Ma P, Liu L Y, Wang F R, Wang S Z, Wang S G,

- Dai Y D 2002 *CN Patent* CN 1352469 [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]]
- [6] Mao H Y, Wang F R, Meng S C, Mao B, LI Z Z, Nie R J, Liu X Y, Dai Y D 2006 *Front. Phys. China* **3** 301
- [7] Zhang Y, Schubert J, Wolters N, Banzet M, Zander W, Krause H J 2002 *Physica C* **372-376** 282
- [8] Gao J, Yang T, Ma P, Dai Y D 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 5044 (in Chinese) [高吉, 杨涛, 马平, 戴远东 2010 物理学报 **59** 5044]
- [9] Koichiro Kobayashi, Yoshinori Uchikawa 2003 *IEEE Trans. Magnetic* **39** 3378
- [10] Bick M, Panaitov G, Wolters N, Zhang Y, Bousack H, Braginski A I 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 3780
- [11] Jenks W G, Sadeghi S S H, Wikswo J P 1997 *Phys.D: Appl.Phys* **30** 293
- [12] Ma P, Dai Y, Gan Z, Yang X, Hua J 2009 *Vacuum Electronics* **1** 33 (in Chinese) [马平, 戴远东, 甘子钊, 杨小牛, 华军 2009 真空电子技术 **1** 33]
- [13] Yi H R, Zhang Y, Schubert J, Zander W, Zeng X H, Klein N 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5966
- [14] Meng S C, Deng P, Nie R J, Xie F X, Ma P, Liu L Y, Wang S Z, Dai Y D 2002 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **24** 179 (in Chinese) [孟树超, 邓鹏, 聂瑞娟, 谢飞翔, 马平, 刘乐原, 王守证, 戴远东 2002 低温物理学报 **24** 179]
- [15] 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]
- [16] Xie Y J, Liu Y, Li L, Ding H Q, Lei Z Y 2009 *HFSS Principle and Engineering Application* (I) (Beijing: Science Press) p58 (in Chinese) [谢拥军, 刘莹, 李磊, 丁海强, 雷振亚 2009 HFSS 原理与工程应用 (第一版) (北京: 科学出版社) 第 58 页]
- [17] Tang M C, Xiao S, Deng T, Wang D, Guan J, Wang B, Ge G D 2011 *IEEE Trans. AP.* **9** 1372
- [18] Zhang Y 2001 *IEEE Trans. Appl. Supercond* **11** 1038

Novel flux concentrator with a single CSRR surrounded by a resonator for radio frequency superconducting quantum interference device*

Wang Yang-Jing^{1)†} Xie Yong-Jun²⁾ Lei Zhen-Ya¹⁾

1) (*Science and Technology on Antenna and Microwave Laboratory, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 5 August 2011; revised manuscript received 21 September 2011)

Abstract

A novel flux concentrator surrounded by a resonator is proposed in this paper. A complementary single split ring resonator (single CSRR) is introduced for the flux concentrator, while the resonator surrounding the flux concentrator employs a third-order stepped-impedance hairpin resonator (SIR). High frequency structure simulation software ANSYS HFSSv.11 is used to simulate the proposed flux concentrator and resonator. Moreover, the single CSRR is analyzed theoretically. Simulation and theoretical results shows that the novel flux concentrator surrounded by a resonator introduces a single CSRR, which improves the flux focus effect of the concentrator significantly, and so enhances the performance of coupling between the RF SQUID and the flux concentrator (the coupling coefficient k_{sc} is improved 2 times) and increases the effective area to 1.227 mm^2 .

Keywords: RF SQUID, flux concentrator, SIR, HFSS

PACS: 42.60.Da, 76.90.+d, 85.25.Dq

* Project supported by the Foundation of the State Key Laboratory of Information Control Technology for Communication System, China (Grant No. 9140C1304021003).

† E-mail: piratewyj@yahoo.com.cn