论 文

六阶极窄带宽高温超导滤波器的研制

季来运^{①*}, 高文斌^②, 何立娟^②, 王朗^①, 孙钧^①, 李演奇^①

① 天津海泰超导电子有限公司, 天津 300384

② 天津理工大学电子信息工程学院, 天津 300384

* 通信作者. E-mail: jilaiyun@163.com

收稿日期: 2013-02-18; 接受日期: 2013-03-11

天津市科技创新资金 (批准号: 12ZXCXGX36800) 和天津市滨海新区科技小巨人成长计划 (批准号: 2011-XJR11020) 资助项目

摘要 文中研制了一款极窄带宽的六阶高温超导滤波器, 成功实现了相对带宽小于 1‰ 的多阶高温超导滤波器的设计与制作. 文中给出了极窄带宽高温超导滤波器的等效电路、理论曲线、耦合矩阵、设计过程、模拟仿真结果以及滤波器的物理电路结构, 有效解决了极窄带滤波器的设计、材料与加工精度的技术难题, 研制的高温超导滤波器使用蒸镀于 0.5 mm 厚度的氧化镁 (MgO) 基片上的 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 双面高温超导薄膜加工制作, 滤波器工作频率约为 900 MHz, 相对带宽为 0.58‰, 滤波器的实际损耗小于 0.6 dB, 带外抑制达到 70 dB 以上, 其测试曲线与模拟仿真结果很好的吻合, 文中的试验结果标志着多阶高温超导滤波器可以实现的最窄带宽达到了一个新的高度.

关键词 高温超导滤波器 极窄带宽 耦合矩阵 电磁场仿真 双面超导薄膜

1 引言

自 1986 年转折温度高于液氮温度 (77 K) 的钇钡铜氧 (YBCO) 材料被发现以来, 超导材料的应用环境温度由液氦温区提升到液氮温区, 应用成本大幅降低, 而高温超导薄膜材料在微波滤波器方面的应用一直是业内科技工作者研究的重点和热点. 在射频和微波频段, 高温超导薄膜材料的微波表面电阻比传统金属材料低 2 到 3 个数量级, 用高温超导薄膜材料可以制作出传统材料难以实现的高陡度、低损耗、窄带宽的高性能滤波器. 将超导滤波器应用于整机系统设备, 可以提高系统的接收灵敏度, 增强系统的抗干扰能力, 大大改善整机技术性能. 因此, 超导滤波技术在雷达、移动通信、深空探测、射电天文等技术领域有着广阔的应用前景. 近年来, 中国的科技工作者在高温超导滤波器技术领域取得了多项可喜的研究成果, 成功研制了包括线性相位特性的、大功率的、信道化的、超宽带的、多通带的等各种不同用途的高温超导滤波器^[1~4].

对于窄带滤波器来讲, 所能实现的最窄带宽主要受限于所用材料的品质因数 (Q 值) 和滤波器的阶数. 若采用普通材料或者电子元件, 由于材料本身的 Q 值不够高, 损耗太大, 只能制作低阶数滤波器, 滤波器的选择性会很差, 就失去了滤波器的有效滤波作用; 若增加滤波器阶数, 则做出来的窄带滤波器插入损耗就会很大, 甚至大到无法忍受的地步, 所以常规材料很难制作出性能优异的窄带滤波

引用格式: 季来运, 高文斌, 何立娟, 等. 六阶极窄带宽高温超导滤波器的研制. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1058–1064, doi: 10.1360/112012-559

图 1 六阶 Chebyshev 滤波器等效电路图

Figure 1 Equivalent circuit of a 6-pole Chebyshev filter

图 2 六阶极窄带宽滤波器理论曲线

Figure 2 The theoretical frequency response of a 6-pole ultra narrow band filter

器. 而高温超导薄膜具有极低的表面电阻, 为设计开发极窄带宽的多阶滤波器提供了可能, 同时, 还可以保持着较低插损的性能优势. 目前对窄带超导滤波器国内外已经有比较深入的研究, 成功实现了 3%~3‰ 相对带宽的多种多阶超导滤波器, 中科院物理所实现了一种适用于雷达系统的相对带宽为 3.7‰ 的高温超导窄带宽滤波器^[5], 采用准椭圆函数型实现了工作于 L 波段的 10 阶高温超导窄带滤波器, 相对带宽为 0.35%^[6]; 天津海泰超导公司制作出了 16 阶高温超导窄带滤波器, 相对带宽为 3%^[7]; 德国的 Reppel 和法国的 Mage 研制出一款高带外抑制的高温超导窄带滤波器, 相对带宽为 0.84%^[8]; 英国伯明翰大学的 Zhou 和 Lancaster 实现了 UHF 波段高温超导窄带滤波器, 相对带宽为 0.82%^[9]. 而对于相对带宽更窄 (小于 1‰) 的超导滤波器来讲, 目前还未见相关成功研制的报道. 对于如此窄的带宽, 滤波器设计难度增大, 各种非预期的寄生效应都会影响滤波器的性能; 材料要求很高, 超导薄膜的不均匀性会对滤波器的性能指标造成极大影响; 加工难度增加, 加工的误差会造成谐振器谐振频率的偏移, 从而引起滤波器总体技术指标的恶化, 甚至达到不可忍受的地步. 本工作突破上述 3 个难点, 成功研制出相对带宽仅为 0.58‰ 的六阶极窄带宽超导滤波器.

2 六阶极窄带宽滤波器的综合

本工作采用 Chebyshev 滤波器结构, 设计的六阶滤波器的等效电路如图 1 所示.

通过切比雪夫滤波器的低通设计原型和传统的设计过程, 结合滤波器的主要技术要求, 得到六阶滤波器的基本电路参数^[10]. 并通过辅助设计软件, 进行滤波器的综合优化, 得到如图 2 所示的六阶极窄带宽滤波器理论曲线, 其中实线为滤波器的 S 参数传输特性, 虚线为 S 参数反射特性.

同时由综合优化后的等效电路元件参数, 可以提取得到六阶极窄带宽滤波器的理论耦合系数矩阵, 以及滤波器外部品质因数 Q_e .

$$K = \begin{bmatrix} 0 & K_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{2,1} & 0 & K_{2,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{3,2} & 0 & K_{3,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{4,3} & 0 & K_{4,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{5,4} & 0 & K_{5,6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{6,5} & 0 \end{bmatrix},$$

其中 $K_{1,2} = K_{2,1} = 0.0005393$, $K_{2,3} = K_{3,2} = 0.0003478$, $K_{3,4} = K_{4,3} = 0.0003269$, $K_{4,5} = K_{5,4} = 0.0003478$, $K_{5,6} = K_{6,5} = 0.0005393$, 滤波器的外部品质因数为: $Q_e = 1329.8536$.

3 六阶极窄带宽高温超导滤波器的设计

通过上节提取的滤波器耦合矩阵参数来指导滤波器物理电路的设计过程, 电磁场模拟仿真工具为 Sonnet 10.52 软件. 在本设计过程中, 由于滤波器带宽太窄, 衬底介质材料的不均匀、超导电路加工误差都会对谐振器的频率造成偏差, 进而使滤波器频率响应恶化. 目前超导滤波器最常用的介质基片材料包括氧化镁 (MgO)、铝酸镧 (LaAlO_3) 和蓝宝石 (Al_2O_3) 3 种, 其中铝酸镧基片存在不可避免的畴的问题, 蓝宝石基片存在各向异性的问题, 从材料的均匀性考虑, 本工作选择材料特性最为稳定的 2 英寸氧化镁基片.

滤波器的总体物理电路为半波长谐振器平行耦合结构, 谐振器结构则遵循简单、稳定、适于弱耦合要求的原则, 确定为旋入旋出式螺旋形结构, 本谐振器结构简单、具有较高的 Q 值^[11,12], 同时较发夹式谐振器结构更为稳定, 因此容易加工, 并且可以有效解决由于氧化镁介电常数相对较小、滤波器工作频率低带来的谐振器长度较长的问题. 谐振器之间的耦合为电场耦合, 场衰减快, 非常适合本设计中的弱耦合要求.

依据耦合参数理论进行高温超导滤波器的物理电路设计^[13], 滤波器微带电路衬底为 0.5 mm 厚度的氧化镁基片, 介电常数为 9.75, 半波长谐振器长度由 (1) 式确定:

$$L = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (1)$$

其中 f_0 为滤波器的中心频率, 本滤波器的设计频率约 900 MHz, c 为自由空间电磁波传播速度, ϵ_{eff} 为超导微带电路衬底的有效介电常数.

将两个谐振器平行排列使其发生耦合作用, 通过 Sonnet 软件进行模拟仿真, 在频率谐振时, 其电流分布如图 3 所示, 可以看出强电流 (深色) 主要出现在谐振器的中心处, 能量则以磁场的形式出现, 而在谐振器的两端, 电流则很弱 (浅色), 能量以电场的形式出现, 所以两谐振器之间的耦合为电场耦

图 3 耦合谐振器电流分布图

Figure 3 The current distribution graphics

图 4 耦合谐振器频率响应曲线图

Figure 4 The frequency response curve of coupled resonators

图 5 滤波器外部 Q_e 值的仿真频率响应图Figure 5 The simulated frequency response diagram of the external Q_e value of filter

合. 两耦合谐振器的频率响应曲线如图 4 所示, 其相位特性 (虚线) 为负值, 验证了两谐振器间的耦合为电场耦合. 其传输特性 (实线) 表现为分离出两个谐振峰 f_1 和 f_2 , 耦合系数 K 则由 (2) 式确定:

$$K = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2}. \quad (2)$$

调整相邻谐振器之间的距离, 使实际的耦合系数与理论值相吻合, 确定滤波器各个谐振器间的间距.

滤波器外部 Q_e 值的仿真频率响应曲线如图 5 所示, Q_e 值的计算则通过 (3) 式确定.

$$Q_e = \frac{f_0}{BW_{-3dB}}, \quad (3)$$

其中 f_0 是耦合谐振频率, BW_{-3dB} 为耦合曲线的 -3 dB 带宽.

图 6 六阶极窄带宽超导滤波器结构示意图

Figure 6 The structure diagram of a 6-pole ultra narrow band superconducting filter

图 7 六阶极窄带宽超导滤波器模拟仿真结果

Figure 7 The simulated results of a 6-pole ultra narrow band superconducting filter

调整输入端口与滤波器第一个谐振器之间的距离, 使实际的 Q_e 值与理论计算值相吻合, 确定滤波器的输入输出端口位置。

通过以上步骤, 可以得到滤波器的初步物理电路结构, 因为寄生效应的存在, 对窄带滤波器的性能影响很大, 所以滤波器电路的初步仿真结果也会和理论曲线存在较大差距, 因此还需要对整个滤波器物理电路进行微调优化, 进而确定滤波器的最终电路, 如图 6 所示, 同时得到满足设计指标要求的滤波器模拟仿真曲线, 如图 7 所示, 其中实线为滤波器的 S 参数传输特性, 虚线为 S 参数反射特性。六阶极窄带宽超导滤波器相对带宽只有 0.58% , 回波损耗设计为 28 dB , 通带波纹优于 0.01 dB , 阻带抑制可达 80 dB 以上, 同时, 由于物理电路整体布局的调整安排, 在阻带产生了寄生传输零点, 有效提升了滤波器的带边陡度, 设计结果达到了预期值。

4 六阶极窄带宽高温超导滤波器的制作结果

将设计的高温超导滤波器制作于 2 英寸双面 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 高温超导薄膜上, 由于本滤波器的带宽极其窄, 所以超导薄膜的均匀性和加工制作的精度都会影响到滤波器的性能指标, 本工作采用多源热共蒸发的方法外延生长高温超导薄膜, 提升了高温超导薄膜的均匀性, 其厚度为 600 nm , 微波表面电阻 R_s 小于 $0.5\text{ m}\Omega$, 临界电流密度 J_c 的均值达到 2.5 MA/cm^2 以上。滤波器芯片的加工制作则采用半导体平面精细加工技术, 特别是采用离子束刻蚀的工艺技术, 提高了超导滤波器电路的加工精度, 将超导电路的加工误差控制在 $\pm 1\mu\text{m}$ 以内, 降低了加工误差对滤波器性能的影响, 提升了滤波器测试结果与设计结果的吻合度。滤波器组装完成后, 在低温真空测试系统中进行性能测试, 测量仪器为 Aglient 公司的 8753ES。在工作温度为 70 K 时, 本滤波器的测试结果如图 8 所示, 其中图 8(a) 为滤波器窄频域的 S 参数传输和反射特性, 图 8(b) 为滤波器 S 参数传输特性通带放大图, 图 8(c) 为滤波器宽频域的 S 参数传输和反射特性, 具体性能如下: 滤波器工作频率约为 900 MHz , 相对带宽为 0.58% , 由于本滤波器需要进行微调, 微调螺钉引入一定的损耗, 同时加上两个 SMA 接头的损耗, 最终的插入损耗小于 0.6 dB , 回波损耗优于 13 dB , 矩形系数为 2.6 , 带外抑制高于 70 dB , 滤波器的输入、输出阻抗为 $50\text{ }\Omega$, 测试结果与设计仿真结果吻合较好, 取得了较为理想的结果。

图 8 六阶极窄带宽高温超导滤波器实测结果

Figure 8 The measured results of a 6-pole ultra narrow band HTS filter. (a) Narrow frequency domain features; (b) pass band amplification figure; (c) broadband domain features

5 结论

本工作解决了极窄带宽高温超导滤波器的设计与制作难题, 成功研制了一款相对带宽仅为 0.58% 的六阶高温超导滤波器, 给出了滤波器的等效电路、理论曲线、耦合矩阵、设计过程与仿真结果. 实现技术指标优异的极窄带宽超导滤波器, 稳定的滤波器结构设计是前提, 均匀的超导薄膜材料是基础, 精细的微带电路加工是保障. 测试结果表明, 滤波器的频域响应曲线与模拟仿真很好吻合, 得到了较为满意的实验结果, 成功实现了相对带宽小于 1% 的多阶超导滤波器的设计和制作.

参考文献

- 1 Ji L Y. The development of HTS filter in the third generation mobile communication. *J Chin Inst Electron*, 2010, 5: 448–454 [季来运. 第三代移动通信用高温超导滤波器的研制. *中国电子科学研究院学报*, 2010, 5: 448–454]
- 2 Wang X H, Zuo T. HTS channelized components. *J Chin Inst Electron*, 2010, 5: 471–475 [王贤华, 左涛. 高温超导信道化组件. *中国电子科学研究院学报*, 2010, 5: 471–475]
- 3 Ji L Y, Ma J, Sun J. Design and performance of dual-band high temperature superconducting filter. *Sci China Inf Sci*, 2012, 55: 956–961
- 4 Chen W, Guo X B, Cao B S, et al. The ultra wide-band HTS filter design in UHF wave-band. *Chinese J Low Temp Phys*, 2009, 31: 210–212 [陈炜, 郭旭波, 曹必松, 等. UHF 波段超宽带高温超导滤波器设计. *低温物理学报*, 2009, 31: 210–212]
- 5 Li F, Zhang X Q, Meng Q R, et al. The HTS narrow-band filter suitable for radar system. *Chinese J Low Temp Phys*, 2006, 28: 301–303 [李翡, 张雪强, 孟庆端, 等. 适用于雷达系统的高温超导窄带滤波器. *低温物理学报*, 2006, 28: 301–303]
- 6 Li C G, Zhang Q, Meng Q D. A high-performance ultra-narrow bandpass HTS filter and its application in a wind-profiler radar system. *Supercond Sci Tech*, 2006, 19: 398–402
- 7 Xu F H, Cheng Y H, Ren J C, et al. Using 16-pole HTS narrow-band filter in TD-SCDMA base station. *Cryogenic Supercond*, 2008, 36: 27–29 [徐凤换, 程耀华, 任建成, 等. TD-SCDMA 基站用 16 阶高温超导窄带滤波器. *低温与超导*, 2008, 36: 27–29]
- 8 Reppel M, Mage J C. Superconducting microstrip bandpass filter on LaAlO₃ with high out-of-band rejection. *IEEE Microw Guid Wave Lett*, 2000, 10: 180–182

- 9 Zhou J F, Lancaster M J. HTS narrow band filter at UHF band for radio astronomy applications. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 1004–1007
- 10 Gan B B, Wu W C. *Structure and Design of Modern Microwave Filter*. Beijing: Science and Technology Publishing House, 1973 [甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计. 北京: 科学技术出版社, 1973]
- 11 Huang F. Ultra-compact superconducting narrow-band filters using single-and twin-spiral resonators. *IEEE Trans Microw Theory*, 2003, 51: 487–491
- 12 Lancaster M J, Huang F, Porch A, et al. Miniature superconducting filters. *IEEE Trans Microw Theory*, 1996, 44: 1339–1346
- 13 Hong J S, Lancaster M J. *Microstrip Filter for RF/Microwave Application* Wiley, 2001. 235–272

Design and performance of a 6-pole ultra-narrow band high temperature superconducting filter

Ji LaiYun^{1*}, GAO WenBin², HE LiJuan², WANG Lang¹, SUN Jun¹ & LI YanQi¹

¹ *Tianjin Hi-Tech Superconducting Electronic Co. Ltd., Tianjin 300384, China;*

² *School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*

*E-mail: jilaiyun@163.com

Abstract In this paper, a 6-pole ultra-narrow band high temperature superconducting (HTS) filter is presented. The equivalent model, theoretical result, coupling matrix, simulated result and the layout of the filter are demonstrated. A desired filter is designed and fabricated using double-sided DyBa₂Cu₃O₇ thin films on 2-inch diameter and 0.5 mm thickness MgO wafer. The fractional bandwidth of the filter is only 0.58% insertion loss is less than 0.6 dB and the out-band rejection is more than 70 dB. The measurement results show that the response of practical filters is in good agreement with the simulated results.

Keywords HTS filter, ultra-narrow band, coupled matrix, EM simulation, double sided superconducting thin film

Ji LaiYun was born in 1973. He received his B.S. degree of physics from Shandong University, Jinan, China, in 1995, and received M.S. degree from NanKai University, Tianjin, China, in 2008. Currently, he is the CTO of Tianjin Hi-tech Superconducting electronic Co. Ltd. His research interest includes high-temperature superconducting thin film, HTS filter, and applications of HTS micro-wave Devices. He is currently a Senior member of Chinese Institute of Electrons as well as a committee member of the Institute of Superconducting Electrons, and graduate supervisor of Tianjin University of Technology.